



S C I E N C E S & H I S T O I R E



François Arago

un savant généreux

Physique et astronomie au XIX^e siècle

James Lequeux



François Arago, un savant généreux

Physique et astronomie au XIX^e siècle

James Lequeux

Astronome à l'Observatoire de Paris



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France



61, avenue de l'Observatoire
75014 Paris
France

« Sciences & Histoire »

La collection Sciences & Histoire s'adresse à un public curieux de sciences. Sous la forme d'un récit ou d'une biographie, chaque volume propose un bilan des progrès d'un champ scientifique, durant une période donnée. Les sciences sont mises en perspective, à travers l'histoire des avancées théoriques et techniques et l'histoire des personnages qui en sont les initiateurs.

Déjà paru :

Léon Foucault, par William Tobin, adaptation française de James Lequeux, 2002

La Physique du xx^e siècle, par Michel Paty 2003

Jacques Hadamard. Un mathématicien universel, par Vladimir Maz'ya et Tatiana Shaposhnikova, 2004. Traduit de l'anglais par Gérard Tronel

L'Univers dévoilé, par James Lequeux, 2005

Pionniers de la radiothérapie, par Jean-Pierre Camilleri et Jean Coursaget, 2005

Charles Beaudouin. Une histoire d'instruments scientifiques, par Denis Beaudouin, 2005

Des neutrons pour la science. Histoire de l'Institut Laue-Langevin, une coopération internationale particulièrement réussie, par Bernard Jacrot, 2006

Histoire d'un pionnier de l'informatique. 40 ans de recherche à l'Inria, par Alain Beltran et Pascal Griset, 2007

Un nouveau regard sur la nature. Temps, espace et matière au siècle des Lumières, par Jacques Debyser, 2007

Imprimé en France

Illustration de couverture : Arago par Charles Steuben (1832).

Crédit : Observatoire de Paris.

ISBN EDP Sciences : 978-2-86883-999-2

ISBN Observatoire de Paris : 978-2-901057-56-7

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© 2008 EDP Sciences

Sommaire

Introduction	v
Chapitre 1. La vie scientifique en France au temps d'Arago	1
Les grandes institutions scientifiques	3
Les grandes écoles	12
Les conditions de la recherche	15
Chapitre 2. La vie d'Arago	29
La famille Arago	30
Les années de jeunesse (1786-1809)	34
La grande période d'activité scientifique (1809-1830)	43
L'homme politique (1830-1838)	52
Les dernières années	67
Chapitre 3. La nature de la lumière	75
Les précurseurs : Huygens et Newton	76
Thomas Young	85
La polarisation de la lumière	93
Arago et Fresnel	101
L'infrarouge et l'ultraviolet	119
Chapitre 4. La vitesse de la lumière	123
La constance de la vitesse de la lumière	124
L'« expérience cruciale » d'Arago	140
La mesure directe de la vitesse de la lumière	146
Chapitre 5. La naissance de l'électromagnétisme	155
La pile électrique	156
L'expérience d'Ørsted	157
Les premières expériences d'Ampère	159
L'intervention d'Arago	165
Arago et Faraday : la transformation de l'énergie	167
Quelques-unes des premières applications de l'électricité	179

Chapitre 6. La mesure de la Terre	191
Les triangulations avant Arago	192
Les travaux d'Arago	209
Nivellement et nouvelles cartes de la France	215
Chapitre 7. Arago et l'Observatoire de Paris	223
L'Observatoire de Paris avant Arago	224
L'Observatoire du Bureau des longitudes	232
La vie à l'Observatoire	245
L'Observatoire à la mort d'Arago	261
Chapitre 8. Arago astronome	265
L'astronomie en France à l'époque d'Arago	266
Les observations astrométriques à l'Observatoire de Paris	274
La polarisation de la lumière et la nature des astres	282
La photométrie	295
La scintillation et le diamètre des étoiles	307
Chapitre 9. Arago géophysicien et météorologue	315
Arago et la météorologie	317
Le magnétisme terrestre	330
Géophysique : la température de la Terre	343
Océanographie	349
Chapitre 10. Vers la physique appliquée	357
Les propriétés optiques des gaz	358
Les phares	363
La vitesse du son	371
La « force élastique » de la vapeur d'eau	373
Chapitre 11. Le promoteur de la science et de la technique	379
La vulgarisation de la science	380
La machine à vapeur et le progrès industriel	391
Les chemins de fer	405
La navigation	416
La photographie	419
Chaux, mortiers et ciments hydrauliques	426
Projets et réalisations à Paris et ailleurs	428
Chapitre 12. L'héritage d'Arago	441
Funérailles et discours	442
Nouveaux temps, nouvelles attitudes	445
Grandeur et décadence de la physique et de l'astronomie françaises au XIX ^e siècle	454

Appendice 1 : La vie et l'œuvre d'Arago dans son temps	457
Appendice 2 : La photométrie d'Arago	463
Première étape : le photomètre d'Arago	463
Deuxième étape : la loi du cosinus carré	466
Appendice 3 : Instructions concernant la physique du globe	469
Les instructions anglaises de 1666	469
Les instructions d'Arago	471
Notes	485
Bibliographie	502
Revue et journaux anciens consultés	502
Écrits d'Arago	502
Livres et documents sur Arago	502
Livres anciens consultés	504
Autres ouvrages consultés	506
Quelques sites Internet utiles	508
Index	509
Liste des crédits	523

Introduction

Arago mettait en circulation plus d'idées à lui seul qu'une génération tout entière.

Léon Foucault, 1853

De nombreuses artères et places en France portent le nom d'Arago, et l'on trouve aussi des monuments qui lui sont dédiés à Paris, à Perpignan et à Estagel, sa ville natale des Pyrénées-Orientales. L'École polytechnique a donné son nom à un amphithéâtre, et l'on trouve également le nom d'Arago au fronton de plusieurs lycées et du laboratoire de biologie marine de Banyuls. Mais si l'on demande autour de soi qui était Arago, on n'obtient généralement que des réponses embarrassées. Certains physiciens s'en souviennent comme d'un collaborateur de Fresnel ; d'autres personnes férues d'histoire citent sa participation au gouvernement éphémère qui suivit la Révolution de 1848. Mais personne ne sait qu'Arago était avant tout astronome.

C'est qu'Arago n'a pas eu de chance avec l'Histoire. L'homme politique est connu des historiens, mais son importance a souvent été sous-estimée¹, et le scientifique a été bien oublié. Et pourtant, le « grand Arago » était sans doute le savant français le plus connu à son époque, aussi bien en France qu'à l'étranger. Ses contributions à la science sont d'ailleurs loin d'être négligeables, et il a joué un rôle éminent pour promouvoir la science et ses applications. Arago est un cas rare de grand savant qui fut aussi un homme politique de premier plan : c'est ce qui a nui à sa réputation posthume, car les deux aspects du personnage se sont éclipsés l'un l'autre. D'autres savants ont fait de la politique pendant la Révolution française et le Premier Empire, comme Jean Sylvain Bailly, le premier maire de Paris, ou Marie Jean Condorcet, ou enfin Joseph Fourier qui fut préfet de l'Isère, mais aucun n'a eu l'envergure et l'impact d'Arago dans les deux domaines à la fois. Le seul que l'on puisse peut-être lui comparer, du ^{XVII}^e siècle à nos jours, est Benjamin Franklin. Bien sûr, des savants éminents ont aussi été ministres de la Recherche scientifique, mais cela faisait en quelque sorte partie de leurs attributions normales.

Arago était doté d'une immense culture scientifique et d'une grande curiosité intellectuelle. Ses centres d'intérêt furent très variés : il explora l'astronomie, la géophysique, la météorologie, et bien sûr la physique dans les domaines naissants de la thermodynamique, de l'optique, de la photographie et de l'électromagnétisme. Il était alors encore possible à un seul esprit de couvrir l'ensemble de la science, et les chercheurs de l'époque étaient souvent peu spécialisés. Très généreux, Arago ne chercha jamais à profiter de sa notoriété et de sa position dominante dans la science française pour faire sa propre publicité. Bien au contraire, quand il collaborait avec d'autres savants comme Augustin Fresnel ou André Marie Ampère, qu'il aidait à faire connaître, il leur laissait toute la gloire même si sa contribution était importante. C'est une autre raison pour laquelle il a été quelque peu oublié. Le physicien Charles Fabry en dit² :

« Ce fut une belle et généreuse intelligence, capable de tout comprendre et de s'intéresser à tout, d'une activité dévorante, ardent dans ses amitiés comme dans ses antipathies, prêt à défendre ses amis dans toutes les circonstances, et toujours prêt à pourfendre ses ennemis. Remarquable professeur, vulgarisateur de tout premier ordre, grand orateur, il eut une influence énorme sur tous les auditoires qu'il aborda. [...] Il sut conserver une grande influence sous tous les régimes, même sous ceux qu'il n'aimait pas, et cela, non pas en les flattant, mais parce qu'on jugeait plus prudent de ne pas l'avoir comme adversaire déclaré. »

Guillaume Bigourdan résume comme suit son activité de physicien, dans son *Histoire du Bureau des longitudes*³:

« Les découvertes d'Arago en Optique et en Électricité pourraient être réclamées par le Bureau ; cependant nous nous bornerons à les citer : c'est en particulier l'électroaimant, devenu aujourd'hui tout à fait populaire — c'est la découverte de la polarisation chromatique, qui date de 1811, puis de la polarisation rotatoire — le magnétisme de rotation — enfin un nombre considérable d'applications et entre autres la détermination des forces élastiques de la vapeur d'eau avec Dulong — l'invention d'un dispositif pour la découverte des écueils en mer en 1835, etc. Nous appuierons davantage sur ce qui concerne la Météorologie et le Magnétisme. »

Les contemporains d'Arago le qualifiaient généralement d'astronome, et non de physicien. En effet, il a fait toute sa carrière scientifique à l'Observatoire de Paris, de 1805 à sa mort en 1853. Et pourtant l'astronome est encore moins bien connu que le physicien, et il est significatif que Bigourdan ne parle pas de son activité astronomique. L'excellent ouvrage de Maurice Daumas consacré à Arago⁴ ne la détaille pas beaucoup, ce que regrette Jean Dhombres dans sa postface de la deuxième édition.

Depuis Daumas, il a été possible d'approfondir de nombreux points de l'activité scientifique d'Arago, et nous avons naturellement désiré la replacer dans la science de l'époque, qui était en pleine ébullition. Nous avons également voulu expliquer en détail ses expériences et ses instruments, qui peuvent poser des problèmes d'interprétation au lecteur de ses publications. Enfin, il nous a paru intéressant de rediscuter l'apport considérable d'Arago aux développements techniques de cette période d'intense activité industrielle ; malchance supplémentaire pour sa mémoire, on en a surtout retenu un aspect négatif : son attentisme en ce qui concerne la construction des chemins de fer. Ce sera l'occasion de survoler la physique d'une époque passionnante qui a vu naître l'essentiel de ce qui nous sert dans notre vie quotidienne : optique, photographie, électricité, thermique et thermodynamique (à l'exception évidemment du téléphone et de l'électronique). Nous verrons aussi que bien des décisions qui ont alors été prises à propos des développements techniques ont encore des prolongements dans la France d'aujourd'hui, que ce soit sur le plan politique ou tout simplement pour notre vie de tous les jours.

Cet ouvrage est donc principalement consacré à l'activité scientifique d'Arago, avec des aperçus sur la recherche de son époque et sur quelques prolongements après sa mort. Le premier chapitre décrit les institutions scientifiques, souvent nées de la Révolution, qui lui ont servi de cadre, et les conditions de la recherche à l'époque ; le second résume la vie d'Arago ; avec le troisième, nous abordons son œuvre scientifique par son travail sur la nature de la lumière ; le quatrième chapitre traite de la vitesse de la lumière.

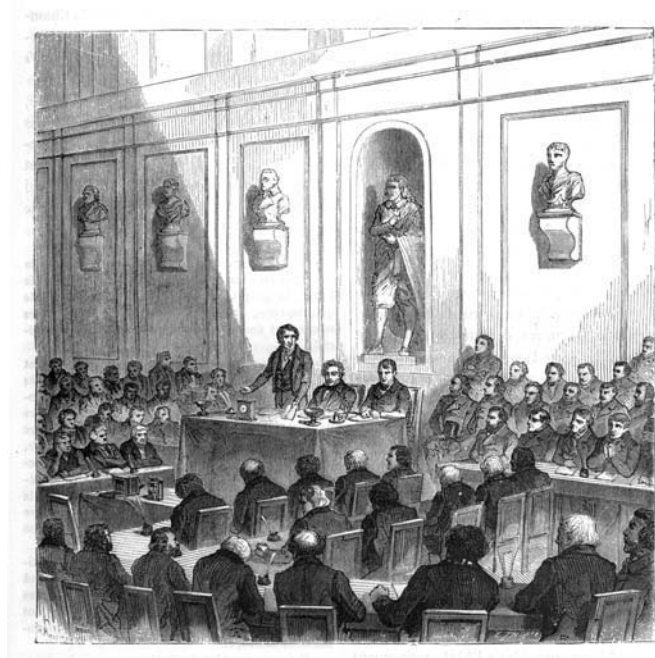
Les débuts de l'électromagnétisme, avec la découverte par Arago du « magnétisme de rotation », font l'objet du chapitre suivant. Les chapitres 6 à 9 traitent de son activité astronomique, au sens large de l'époque : géodésie, puis instrumentation astronomique et astronomie proprement dite, enfin géophysique et météorologie. Le chapitre 10 discute celles des activités d'Arago qui concernent la physique appliquée. Le chapitre 11 parle de ses actions pour promouvoir la science. Enfin le dernier chapitre résume ce qui nous reste de ce grand savant. Ces différents chapitres peuvent se lire dans un ordre arbitraire. Le lecteur a cependant intérêt à lire d'abord les chapitres 1 et 2, et à lire le chapitre 7 avant le chapitre 8.

Je remercie chaleureusement mon épouse Geneviève, et aussi Claudine Laurent, Charles Ryter, Suzanne Débarbat et William Tobin pour leur relecture attentive qui a considérablement amélioré le texte. Laurence Bobis a collaboré avec moi pour préparer l'exposition « François Arago et l'Observatoire de Paris » qui s'est tenue à l'Observatoire en 2003, ainsi qu'une exposition sur Léon Foucault et une autre sur la vitesse de la lumière, et ce livre lui doit beaucoup. Je tiens à remercier la bibliothèque de l'École polytechnique (et en particulier Madame Thooris), les Archives de l'Académie des sciences, le Musée des arts et métiers/CNAM et le Rectorat de Paris pour m'avoir permis de reproduire de nombreuses illustrations ; Gilbert Amat, Danièle Briot, Danièle Blouet, Pierre Encrenaz, Jean-Louis Le Mouël et William Tobin m'ont ouvert leur collection privée dans le même but ou autorisé à reproduire des figures dont ils sont l'auteur. Je veux aussi remercier le personnel de la bibliothèque de l'Observatoire de Paris, particulièrement Laurence Bobis, Danièle Destombes, Dominique Monseigny et Robert Zeganadin, pour son amabilité, sa compétence et sa promptitude à accéder à mes demandes. Enfin je voudrais rendre hommage à la Bibliothèque nationale de France pour avoir créé *Gallica*, qui est un incomparable instrument de travail pour l'historien. De même, je remercie l'*Astrophysics Data Service* (ADS), qui permet d'accéder en ligne à l'essentiel des journaux astronomiques anciens.

Dans les textes cités, j'ai scrupuleusement conservé l'orthographe originale. Je suis responsable de la traduction des textes anglais.

Chapitre 1

La vie scientifique en France au temps d'Arago



Arago présente les détails
du procédé photographique
de Daguerre lors de la
séance publique commune
de l'Académie des sciences et
de l'Académie des beaux-arts,
le 19 août 1839.

La vie de la science pendant la première moitié du XIX^e siècle est dominée par la présence de plusieurs institutions puissantes. Certaines sont très anciennes : l'Académie des sciences née en 1666, l'École des ponts et chaussées a été fondée en 1747 et l'École des mines en 1783; sans oublier le Collège de France créé en 1530 par François 1^{er}. D'autres datent de la Révolution : l'École polytechnique, l'École normale supérieure et le Bureau des longitudes. On trouve aussi parmi ces nouvelles institutions le Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), où est déjà réunie une immense collection d'objets et où des savants donnent des cours. Des Écoles des arts et métiers, en province, dépendent en partie de ce Conservatoire. Par ailleurs, l'enseignement secondaire est réformé sous la Convention par la création des Écoles centrales, l'équivalent de nos actuels lycées, qui remplacent souvent des écoles plus anciennes. Quant à l'enseignement primaire, il est théoriquement obligatoire, mais le manque d'enseignants rendra cette mesure sans grand effet jusqu'à la Troisième République. Il n'en reste pas moins que l'époque révolutionnaire permet l'accès à l'éducation de nombreux enfants des classes moyennes et défavorisées, dont certains occuperont ensuite les plus hautes fonctions : de telles possibilités d'ascension sociale ne se retrouveront qu'à la fin du XIX^e siècle, pour s'atténuer malheureusement à nouveau au cours du XX^e siècle.

Le monde scientifique du XIX^e siècle est un monde d'hommes. Rares sont les femmes qui ont accès à l'éducation supérieure, et exceptionnelles celles qui peuvent s'affirmer en tant que savantes : on ne peut guère citer en France que la mathématicienne Sophie Germain, qui a fait d'importants travaux sur la théorie de l'élasticité. Aucune femme ne figure dans les institutions que nous venons de mentionner. Si certaines jouent alors un rôle dans la science, ce n'est guère qu'en aidant un parent, comme ce sera le cas vis-à-vis d'Arago de sa nièce Lucie Laugier à la fin de sa vie. La situation s'améliorera au XX^e siècle, sans être encore satisfaisante aujourd'hui.

Nous allons examiner tour à tour les institutions scientifiques, puis décrire les conditions dans lesquelles travaillent les savants de l'époque.

Les grandes institutions scientifiques

L'Académie des sciences¹

Créée par Colbert en 1666, l'Académie des sciences est d'emblée le centre de la vie scientifique en France. Malgré son origine royale, elle traverse sans trop de difficultés la période révolutionnaire, disparaissant en 1793 pour ressusciter en 1795 sous le nom de *Première classe de l'Institut national*. Elle reprend son nom premier en 1816. Elle comprend deux divisions, l'une consacrée aux Sciences mathématiques englobant mathématiques, astronomie, géographie et navigation, et physique proprement dite, et l'autre aux Sciences physiques, en fait la chimie et les sciences naturelles. Ces dénominations ont été remplacées respectivement en 1955 par celles, plus conformes à la réalité, de *Sciences mathématiques et physiques* et de *Sciences chimiques et naturelles*.

Les séances hebdomadaires de l'Académie des sciences sont conduites par son président, renouvelé chaque année, mais les personnages les plus importants sont les deux secrétaires perpétuels, dont les postes sont créés en 1803. Du temps d'Arago, le secrétaire perpétuel pour les Sciences mathématiques est d'abord Jean-Baptiste Joseph Delambre, remplacé après sa mort en 1822 par Joseph Fourier auquel succède en 1830 Arago lui-même. Pour les Sciences physiques, c'est d'abord Georges Cuvier, puis en 1832 Pierre Louis Dulong, qui appartient pourtant aux Sciences mathématiques ; il démissionne l'année suivante pour être remplacé par le physiologiste Pierre Flourens, qui aura de bonnes relations avec Arago.

À cette époque, la division des Sciences mathématiques comprend cinq sections, et celle des Sciences physiques six ; chaque section se compose de six membres résidents, c'est-à-dire habitant Paris et assistant régulièrement aux séances (seulement trois membres jusqu'en 1816 pour la section Géographie et navigation). Il s'y ajoute une douzième section dite libre comportant dix académiciens rescapés de temps plus anciens, et un certain nombre de membres non résidents et de correspondants français ou étrangers (tableau 1.1). Certains de ces correspondants sont fort actifs, notamment en astronomie où ils font parvenir régulièrement des observations à l'Académie. La figure 1.1 donne la liste des membres résidents de 1795 à la mort d'Arago en 1853, pour les

sections 1, 2, 3 et 5 qui nous intéressent principalement dans ce livre.

Tableau 1.1. Composition de l'Académie des sciences après 1816.

Division	Section	Nombre de membres	Nombre de correspondants
Sciences mathématiques	1. Géométrie	6	6
	2. Mécanique	6	6
	3. Astronomie	6	16
	4. Géographie et navigation	6	8
Sciences physiques	5. Physique générale	6	6
	6. Chimie	6	12
	7. Minéralogie	6	8
	8. Botanique	6	10
	9. Économie rurale et art vétérinaire	6	10
	10. Anatomie et zoologie	6	10
	11. Médecine et chirurgie	6	8
–	12. Libre	10	
–	Membres non résidants	6	
–	Associés étrangers	8	

Il y a aussi des membres associés étrangers, non rattachés à une section particulière. Être nommé associé est évidemment honorifique, ce qui n'empêche pas certains d'être fort actifs, comme Alexandre de Humboldt lors de son séjour à Paris. Le tableau 1.2 donne la liste des associés mathématiciens, astronomes et physiciens. Tous ont un nom reconnu dans l'histoire des sciences, ce qui prouve l'excellent jugement de l'Académie.

Les communications à l'Académie peuvent être lues intégralement ou faire l'objet d'un résumé. Les mémoires qui proviennent d'auteurs extérieurs à l'Académie sont évalués par une commission *ad hoc* de quelques membres. Pour ceux qui sont jugés les plus importants, cette commission présente un rapport lors d'une de ses

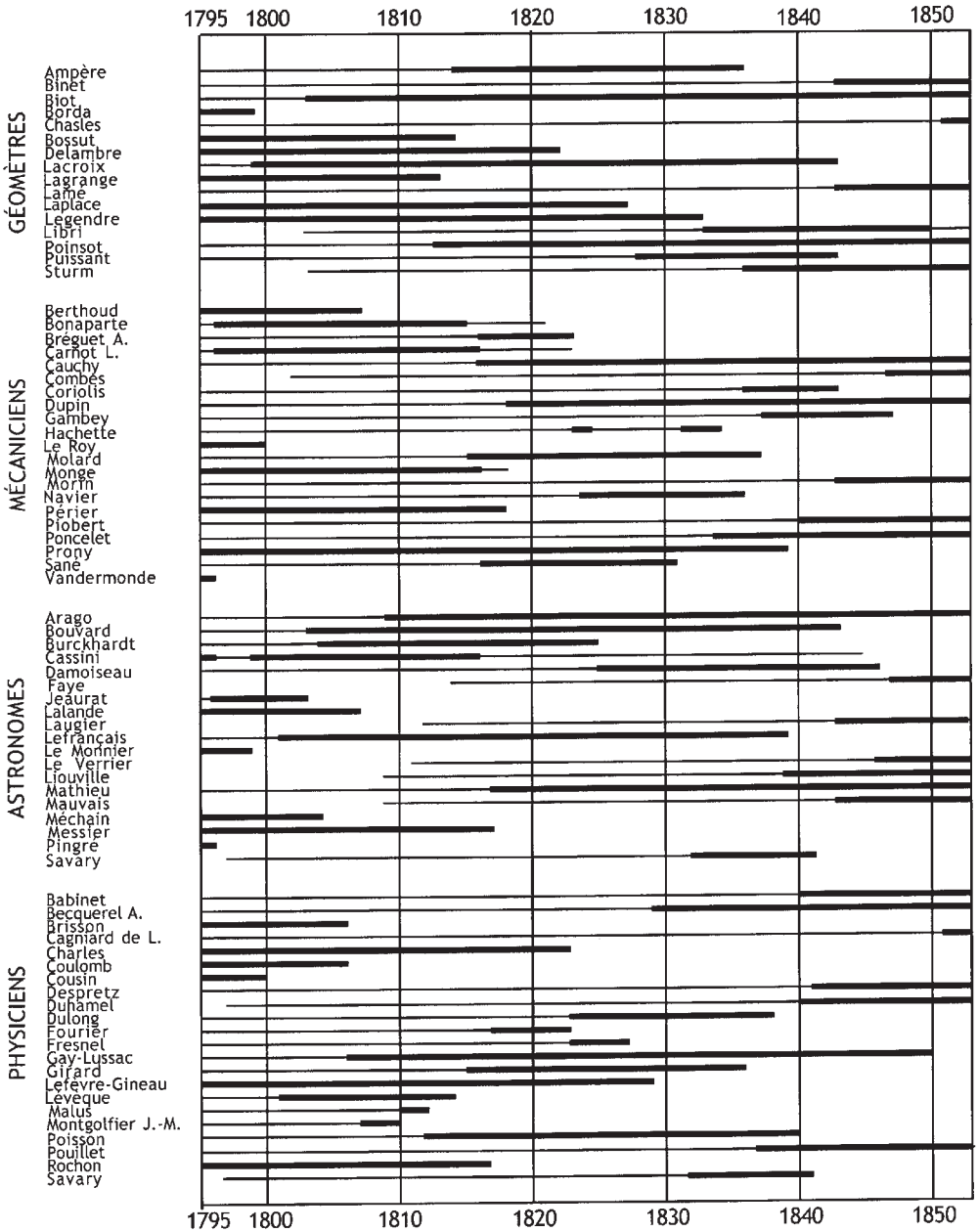


Figure 1.1. Membres résidants des sections 1, 2, 3 et 5 de la première classe de l'Institut puis de l'Académie des sciences de 1795 à 1853, date de la mort d'Arago. Bonaparte, qui s'était fait élire en 1796, et Jean Dominique Cassini (Cassini IV) ont démissionné de l'Académie avant leur mort. Certains membres ont été radiés pour raisons politiques : Cassini IV de 1796 à 1799, Lazare Carnot et Monge en 1816. Hachette a été radié peu après son élection en 1823, puis réélu en 1831.

séances, rapport qui est souvent un résumé écrit par l'auteur. On peut également écrire à l'Académie, et les secrétaires perpétuels commencent la séance par la lecture des résumés de cette correspondance. Enfin, l'Académie accepte des plis ou des paquets cachetés où l'on peut enregistrer des découvertes ou des idées que l'on juge insuffisamment développées pour être présentées : l'auteur peut en demander l'ouverture pour faire valoir sa priorité si quelqu'un vient à présenter des idées similaires.

Tableau 1.2. Membres associés étrangers de l'Académie des sciences de 1795 à 1853. La liste ne comprend pas les membres spécialisés en sciences de la nature.

Spécialité principale	Nom	Nationalité	Naissance	Élection	Décès
Mathématiques	Bessel	allemand	1784	1840	1846
	Jacobi	allemand	1804	1846	1851
	Gauss	allemand	1777	1820	1850
Astronomie	Herschel	anglais	1738	1802	1822
	Maskelyne	anglais	1732	1802	1811
	Olbers	allemand	1758	1829	1840
	Piazzi	italien	1746	1817	1826
Physique	Brewster	écossais	1781	1849	1868
	Cavendish	anglais	1731	1803	1810
	Faraday	anglais	1791	1844	1867
	Ørsted	danois	1777	1842	1851
	Rumford	américain	1753	1803	1814
	Volta	italien	1745	1803	1827
	Watt	anglais	1736	1814	1819
	Wollaston	anglais	1766	1823	1828
	Young	anglais	1773	1827	1829
Diverses	Humboldt	allemand	1769	1810	1859

Les séances de l'Académie des sciences ne sont pas publiques : seuls quelques auditeurs choisis peuvent y assister. Mais, devenu secrétaire perpétuel, Arago y fait admettre à partir de 1835 tous ceux qui le désirent, en particulier des journalistes. On y voit régulièrement Alfred Donné puis Léon Foucault, qui écrivent des comptes rendus de ces séances dans le *Journal des Débats*, un quotidien très influent auprès des hommes politiques.

Lorsqu'un mémoire présenté à l'Académie est jugé digne d'être publié intégralement, il est imprimé dans les

Mémoires de l'Académie des sciences (ou de l'Institut selon l'époque), mais cette publication prend des années^a ; entre-temps, il est interdit à son auteur de publier ailleurs les résultats qu'ils contiennent. Nous verrons comment Arago réussit à tourner en partie cette difficulté. Mais surtout, il crée en 1835 les *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, préparés à l'issue de chaque séance par les secrétaires perpétuels, qui permettent de diffuser rapidement les résultats scientifiques auprès d'un large public (figure 1.2).

On ne saurait sous-estimer l'importance de l'Académie des sciences dans la vie scientifique de l'époque. Il est évident qu'à quelques exceptions près, la recherche active est faite par ses membres. La liste des académiciens dans la première moitié du XIX^e siècle est impressionnante : peu de noms ont été oubliés par les historiens, les scientifiques et même par le grand public. Et l'on conçoit que des secrétaires perpétuels comme Arago ont le pouvoir d'influencer toute la vie scientifique de leur époque en France.



Figure 1.2. Page de titre du premier numéro des Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences.

D'autres sociétés savantes³

Il existe en France d'autres cénacles scientifiques. Beaucoup de villes de province possèdent leur propre académie. Pour Paris, où l'on trouve entre autres la *Société d'encouragement pour l'industrie nationale* et la *Société de géographie*, nous dirons quelques mots de la *Société philomathique* (ou *philomatique* ; étymologiquement : qui aime le savoir). Elle avait été fondée en 1788 par quelques jeunes gens qui y exposaient et discutaient les découvertes récentes. Lorsque l'Académie royale des sciences fut supprimée en 1793, les académiciens en firent aussitôt leur lieu de rencontre. On pouvait donc y rencontrer Pierre-Simon Laplace, Georges Cuvier et aussi Antoine Laurent de Lavoisier, qui devait être guillotiné l'année suivante comme tous les fermiers généraux. Le nombre de ses membres atteignit vite la soixantaine ; il ne fut plus dépassé par la suite. La société survécut à la création de l'Institut national, et devint au cours des temps une sorte d'antichambre de l'Académie des sciences. Les candidats

^a Certains mémoires de savants français ou étrangers non membres de l'Académie sont également publiés dans les *Mémoires des savants étrangers*.



Figure 1.3. Claude-Louis Berthollet (1748-1822) vers 1820.



Figure 1.4. Pierre-Simon Laplace (1749-1827).

à la Société philomathique n'ont pas à attendre le décès de membres pour occuper un siège : en effet, les membres de la société demandent souvent à devenir membres honoraires après dix à quinze ans, notamment lorsqu'ils accèdent à l'Académie. C'est ainsi qu'Arago, Malus, Fresnel, Gambey et bien d'autres ont été temporairement membres de la Société philomathique. La Société publie des extraits des procès-verbaux de ses séances qui ont lieu chaque samedi soir, extraits qui peuvent être considérés comme des publications. Elle publie aussi un *Bulletin des sciences* dont nous dirons un mot plus loin.

Moins durable, mais peut-être plus active fut la *Société d'Arcueil*. Le chimiste Claude Berthollet (figure 1.3), qui habite la ville d'Arcueil, à deux kilomètres de la limite sud actuelle de Paris, reçoit souvent chez lui de jeunes savants. Pierre-Simon Laplace (ou de Laplace selon les temps ; figure 1.4) ayant acquis à Arcueil une propriété mitoyenne de celle de Berthollet, les deux savants sympathisent et une porte de communication est ouverte entre les deux domaines. Comme ils sont tous deux des sommités reconnues, Berthollet et Laplace n'ont aucune difficulté à attirer de jeunes scientifiques qui se réunissent à Arcueil tous les quinze jours, le jeudi ou le dimanche après-midi. Il se forme ainsi en 1801 une société qui acquiert un statut semi-officiel en 1805, sous la protection de l'Empereur. Les jeunes chercheurs peuvent utiliser le laboratoire de Berthollet pour faire des expériences, mais surtout présentent leurs idées qui sont discutées par le groupe. Il arrive souvent qu'un mémoire discuté le dimanche soit présenté le lendemain devant la Première classe de l'Institut, avec les révisions suggérées par la Société. Celle-ci est dissoute en 1816, non sans avoir publié ses mémoires en trois volumes, dont le premier est paru en 1807. À cette dernière date, la Société comprend outre Laplace, Berthollet et son fils Amédée, le physicien Jean-Baptiste Biot, les chimistes Louis Joseph Gay-Lussac et Louis Jacques Thenard, le botaniste suisse Augustin Pyrame de Candolle, le minéralogiste Alphonse Victor Collet-Descotils, et aussi Humboldt. Arago la fréquente dès 1807, ainsi que Malus et Pierre Louis Dulong, avec lequel il va collaborer plus tard.

Le Bureau des longitudes⁴

Une importante création de la Convention est le Bureau des longitudes, fondé par la loi du 8 Messidor An III

(25 juin 1795) sur rapport du citoyen Henri Grégoire, dit l'abbé Grégoire, au nom des Comités de Marine, des Finances et de l'Instruction publique. Il a pour mission de « faire fleurir notre marine et [de] favoriser la marine et le commerce par le développement de l'Astronomie », dont on rappelle les bienfaits : elle a chassé la « Superstition », créé la « Chronologie » et donné

« une base fondamentale à la Géographie et à la Navigation par la solution, encore imparfaite, du problème des Longitudes.

Le bureau

- continuera les efforts de l'ancien Gouvernement pour résoudre ce même problème;*
- améliorera les cartes et l'Hydrographie ;*
- étudiera le Magnétisme terrestre, particulièrement à la mer ;*
- développera l'Horlogerie ;*
- rendra la Navigation plus sûre, et ainsi protégera mieux la vie de nos marins.*

À cet effet, le Bureau

- fera chaque année un Cours public d'astronomie ;*
- perfectionnera les tables astronomiques ;*

Le Bureau des longitudes est chargé de rédiger la Connaissance des Temps. [...] Il perfectionnera les Tables astronomiques et les méthodes des longitudes, et s'occupera de la publication des observations astronomiques et météorologiques ».

Dans le rapport, la météorologie est qualifiée de « science peu avancée, particulièrement utile à l'Agriculture ».

« [Le Bureau] a dans son attribution : l'Observatoire national de Paris, le plus beau monument élevé à l'astronomie [...], presque désorganisé, et celui de la ci-devant École militaire, les logements qui y sont attachés, et tous les instruments d'astronomie qui appartiennent à la Nation. » On y ajoute en 1796 l'ancien observatoire de Nicolas Louis de La Caille, mort en 1762, qui est situé au Collège des Quatre-Nations. Le Bureau aura constamment à cœur de s'occuper des instruments et nouera des contacts étroits avec leurs constructeurs, par exemple avec Noël-Jean Lerebours qui sera nommé « opticien de l'Observatoire » en 1814. En outre, le décret de fondation stipule qu'« il sera pris, dans les dépôts de livres appartenant à la Nation, et dans les doubles de la Bibliothèque nationale, les livres nécessaires pour compléter la bibliothèque commencée à l'Observatoire de Paris ». C'est

l'origine de la bibliothèque actuelle, dont la richesse en fonds anciens est exceptionnelle.

Par ailleurs, le Bureau « *indiquera les observatoires à établir, à conserver, à développer, au nombre desquels sont ceux des ports de Brest et de Toulon, qui sont les principaux arsenaux des forces maritimes de la République, où les besoins de la marine commandent impérieusement l'établissement d'Observatoires* ». Parmi les observatoires à conserver, on trouve les Observatoires de Marseille et de Toulouse, où sont transférés certains instruments parisiens au fur et à mesure de leur remplacement par des instruments plus modernes. Le Bureau envoie aussi à l'occasion des instruments à des observatoires privés comme celui d'Honoré Flauguergues à Viviers en Ardèche.

Le Bureau aurait dû réaliser, sans doute à la suite de la visite de Cassini IV à William Herschel en 1787, où il avait vu à Slough en Angleterre ses grands télescopes⁵, « *un télescope ... ayant 60 pieds de long, sur 6 pieds de diamètre* » qui ne verra jamais le jour. Par ailleurs, le Bureau doit « *s'[occuper] de fixer le premier méridien* ». Cette dernière opération concerne évidemment la mesure du méridien de Dunkerque à Barcelone en cours de réalisation par Jean-Baptiste Delambre et Pierre André Méchain, qui a été placée sous la responsabilité du Bureau dès la création de celui-ci. Nous en reparlerons au chapitre 6.

Le rôle du Bureau des longitudes est donc, en principe, complètement centré sur la navigation en mer et la géodésie, avec une petite incursion vers la météorologie. Mais comme il est entièrement responsable des observatoires, son action s'étend en pratique à toute la recherche astronomique.

Le Bureau des longitudes a au départ un budget de fonctionnement annuel de 12 000 livres « *pour entretenir les instruments* », et son personnel est formé de membres titulaires au salaire de 8 000 livres par an, et de membres adjoints payés 4 000 livres. Les crédits d'équipement sont attribués à sa demande en fonction des opérations nécessaires, comme la construction ou la maintenance d'instruments ou de bâtiments. La figure 1.5 donne l'évolution du personnel du *Bureau des longitudes*, moins nombreux que celui du *Board of longitudes* anglais, et dont l'essentiel travaille à l'Observatoire de Paris. Les administrateurs du Bureau sont successivement Delambre en 1800, remplacé par Méchain en 1801 puis par le géographe Buache de la Neuville en 1803, enfin par l'astronome Alexis Bouvard

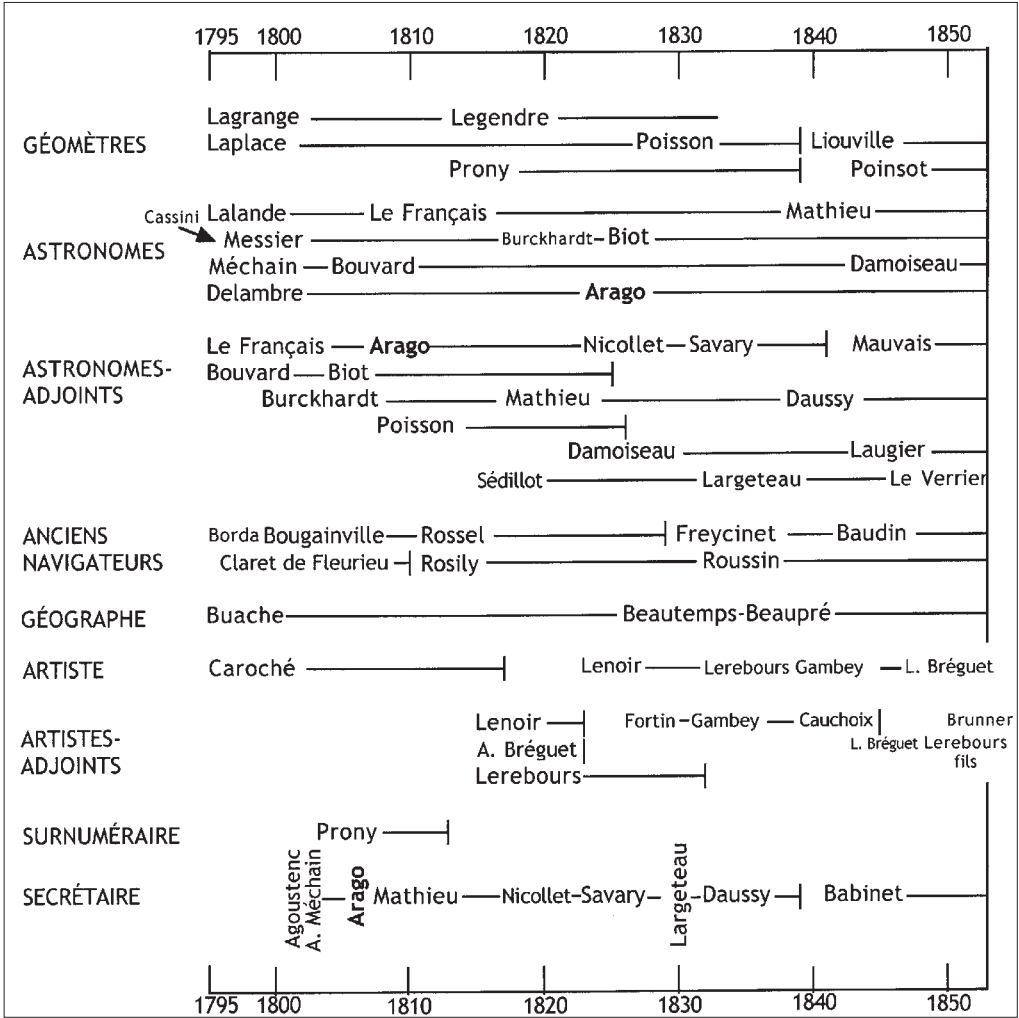


Figure 1.5. Les membres du Bureau des longitudes de son origine à la mort d'Arago⁶. Il y a un second surnuméraire depuis 1802, qui n'est pas porté dans cette figure : Sédillot « adjoint pour l'histoire de l'Astronomie chez les Orientaux », qui bénéficiera plus tard d'un poste ordinaire comme indiqué.

de 1814 jusqu'à (peut-être) son décès en 1843 ; peut-être, car le titre d'administrateur est de moins en moins utilisé. Le 9 avril 1834, Arago est nommé Directeur des observations, poste créé pour lui et qu'il conservera jusqu'à sa mort : ceci le rend alors directeur de fait de l'Observatoire de Paris, et il peut faire faire les observations par des « jeunes gens qui portent le titre d'élèves observateurs ».

Au remplacement d'Arago par Urbain Le Verrier, les prérogatives du Bureau des longitudes sont considérablement réduites : l'Observatoire de Paris prend alors son indépendance, et certains observatoires de province deviendront ultérieurement des « succursales de l'Observatoire de Paris ».

Les grandes écoles

Quelques grandes écoles existaient avant la Révolution : des écoles militaires d'application pour le génie, l'artillerie et la marine, et l'École des ponts et chaussées, qui comme son nom l'indique forme des ingénieurs en travaux publics. À la fin du XVIII^e siècle et au début du siècle suivant, elle est dirigée par François Marie Riche de Prony. Parmi les travaux que Prony pilote se trouve la construction de nouvelles tables de lignes trigonométriques en grades (1/400 de la circonférence du cercle), après que la Convention eut décidé que toutes les grandeurs usuelles seraient exprimées en unités décimales^b. Mais peu de recherches scientifiques proprement dites ont été effectuées dans cette école.

L'École polytechnique⁷

Après l'enthousiasme de 1789, la France se trouve en 1794 dans une situation très difficile. Elle manque notamment de cadres scientifiques et techniques, beaucoup ayant d'ailleurs disparu pendant la Terreur, comme Lavoisier et Condorcet. À l'instigation de quelques savants réputés ralliés aux idées républicaines, en particulier du géomètre Gaspard Monge (figure 1.6) et du chimiste Antoine François de Fourcroy, le Comité de Salut public crée alors une Commission des travaux publics, laquelle recommande la création d'une nouvelle école pour unifier la formation des ingénieurs militaires et civils. Le 7 Vendémiaire an III (28 septembre 1794),



Figure 1.6. Gaspard Monge (1746-1818).

^b On sait que le calendrier décimal et surtout l'heure décimale n'eurent qu'une existence éphémère, mais beaucoup d'instruments topographiques virent leur cercle divisé en 400 grades, et les grades étaient encore utilisés par les topographes au XX^e siècle. Pour ce travail, Prony employa une dizaine de calculateurs.

L'École centrale des travaux publics est fondée, et les cours commencent trois mois après dans les dépendances du Palais-Bourbon. Elle prendra un an plus tard le nom d'École polytechnique.

La mission de l'École est clairement définie : donner aux élèves une solide formation scientifique appuyée sur les mathématiques, la physique et la chimie, et les former pour entrer dans les écoles spéciales des services publics de l'État, comme l'École d'application de l'artillerie et du génie, l'École des ponts et chaussées, et l'École des mines nouvellement créée. Le concours d'entrée ne comprend qu'une épreuve orale de mathématiques, et les études durent trois ans. Les élèves reçoivent initialement une indemnité pour se rendre à Paris le cas échéant, et un salaire de 900 francs par an. Ils sont externes, logés chez des « pères sensibles » recommandés par les sections des comités de Salut public et dont on surveille de près les opinions politiques.

Il y a environ 400 élèves. L'enseignement est donné par des professeurs éminents (cependant le niveau de l'enseignement de la physique est médiocre au début). La grande majorité des jeunes savants de l'époque l'ont suivi. L'excellence de Polytechnique explique que Bonaparte ait choisi d'emmener avec lui en Égypte, de 1797 à 1798, le principal fondateur de l'École, Monge, ainsi que Berthollet qui y était professeur et 42 élèves tout juste diplômés ou même encore en cours de scolarité. Cependant l'École est un foyer d'agitation politique, et les élèves refusent en 1804 d'adresser leurs félicitations à l'Empereur qui vient de se couronner lui-même (nous verrons qu'Arago n'est pas pour rien dans ce refus). Napoléon décide alors de donner à l'École un régime militaire et de « caserner » les élèves. Ces derniers sont par ailleurs privés de traitement dans le dessein clair mais inavoué d'en faire une sélection par l'argent, alors que l'École avait été précédemment un facteur important de promotion sociale. Elle est transférée sur la montagne Sainte-Genève, dans les locaux désaffectés d'anciens collègues qu'elle occupera jusqu'en 1976.

L'Empire ne réussira jamais à rallier les élèves à sa cause, mais Louis XVIII, lorsqu'il revient d'exil, ne saisit pas l'occasion pour les rallier à la sienne : il commence par renvoyer Monge, puis en 1816 par licencier provisoirement les élèves et même les professeurs de l'École à la suite d'un chahut. L'École redevient civile, puis à nouveau

militaire en 1820. De toute façon, les élèves sont toujours en internat et soumis à une discipline tatillonne. Il ne faut pas s'étonner qu'ils soient en opposition de plus en plus forte au régime, et qu'ils prennent fait et cause pour le peuple parisien lors de la Révolution de 1830 ; l'élève Vaneau est d'ailleurs tué sur les barricades. Sous Louis-Philippe, l'École voit son statut militaire confirmé, ce qui n'empêche pas les élèves de manifester bientôt leur opposition au régime, qui les licenciera plusieurs fois. Ils sortent à nouveau dans la rue en 1848, toutefois avec moins d'esprit révolutionnaire qu'en 1830. Par la suite, l'agitation politique s'atténuera à l'intérieur de l'École.

Malgré toutes ces vicissitudes, l'École polytechnique est toujours restée un foyer scientifique très important. Elle a possédé assez vite des laboratoires de physique et de chimie bien équipés, souvent grâce à l'intérêt de Bonaparte pour la science, intérêt qu'il conservera lorsqu'il deviendra empereur (voir plus loin la figure 5.3 représentant la grande pile électrique installée par financement spécial de l'Empereur vers 1811). Les professeurs et leurs assistants reçoivent des salaires qui les mettent à l'abri du besoin, et peuvent faire de la recherche. Beaucoup de leurs résultats, surtout en mathématiques pures et appliquées, sont publiés dans le *Journal de l'École polytechnique*. Cette École et les observatoires astronomiques ont été les institutions de recherche les plus actives en France pendant la première moitié du XIX^e siècle.

L'École normale supérieure

L'École normale supérieure voit le jour le 9 Brumaire an III (30 octobre 1794), peu après l'École polytechnique : sur rapport de Joseph Lakanal au nom du Comité d'instruction publique, la Convention décrète « *qu'il serait établi à Paris une École normale, où seraient appelés, de toutes les parties de la République, des citoyens déjà instruits dans les sciences utiles, pour apprendre, sous les professeurs les plus habiles dans tous les genres, l'art d'enseigner* ». Plus précisément, il s'agit de former les professeurs des écoles centrales, les ancêtres de nos lycées. L'École formera relativement peu de chercheurs au XIX^e siècle, mais ses anciens élèves ont une bonne culture qui en fait aussi d'excellents collaborateurs scientifiques. Par exemple, Antoine Quet, professeur au collège Saint-Louis, travaille en 1852 avec Léon Foucault sur le gyroscope : il en fait la difficile théorie tandis que

Foucault réalise les expériences⁸. Le savant le plus célèbre de l'époque issu de l'École normale supérieure est Joseph Fourier ; on trouve aussi parmi les anciens élèves le physicien Claude Pouillet et l'astronome Jean-Nicolas Nicollet, dont nous aurons l'occasion de reparler.

Bien entendu l'École possède pour l'enseignement des laboratoires de physique, de chimie et de sciences naturelles. Mais on y fait peu de recherche en comparaison de l'École polytechnique. Il faudra attendre 1851 pour qu'un véritable laboratoire de chimie soit fondé par Henri Sainte-Claire Deville.

Les conditions de la recherche

La nature de la recherche

La conception que l'on a de la science au début du XIX^e siècle ne diffère pas beaucoup de celle que l'on en a aujourd'hui. En revanche, elle n'a plus grand chose à voir avec celle du XVII^e siècle. En général, le savant du XVII^e siècle, que l'on qualifie de *philosophe*, étudie la nature depuis son cabinet. Quand il lui arrive de voyager, il glane des observations nouvelles au hasard des rencontres. La science se fait un peu au petit bonheur la chance, sans plan préconçu sinon sans idées préconçues. Cependant, la fin de ce siècle voit naître des entreprises scientifiques, organisées par la toute nouvelle Académie des sciences : la première mesure d'un arc de méridien par Jean Picard, de Paris à Amiens (1669), la première véritable expédition scientifique, celle de Jean Richer à Cayenne (1672), et la mesure systématique de la latitude et de la longitude des principales villes de France et des pays voisins (1679-1682). Ces entreprises, qui peuvent avoir soit un but purement scientifique, soit une finalité pratique comme la cartographie du royaume, se développent considérablement au XVIII^e siècle, pour culminer avec la mesure des arcs de méridien au Pérou (1735-1743) et en Laponie (1736-1737), et la réalisation de la carte de France dite de Cassini, qui occupe toute la seconde moitié de ce siècle. De même, les astronomes français et étrangers s'organisent pour observer les passages de Vénus devant le Soleil en 1761 et 1769 en différents endroits du globe, dans le but de mieux déterminer les dimensions du Système solaire.

On imagine bien que ces opérations demandent une préparation, un financement et une coordination semblables à celles des grands projets scientifiques actuels. L'État doit nécessairement intervenir dans la réalisation de ces grandes entreprises, qu'il a souvent suscitées lui-même. Les scientifiques et les ingénieurs constructeurs d'instruments sont amenés à travailler en équipe, une situation totalement nouvelle à l'époque. Les théoriciens doivent agir en harmonie avec les chercheurs de terrain pour interpréter leurs données, par exemple pour la détermination de la figure de la Terre. Bref on atteint dans les domaines correspondants, qui relèvent principalement de l'astronomie, un degré de maturité semblable à celui de la recherche actuelle.

Cependant, l'évolution des esprits est plus lente dans les autres domaines de la science. Il faut se débarrasser de préjugés tenaces, démolir les anciennes philosophies de la matière et créer pour les remplacer des concepts nouveaux basés sur des observations réellement scientifiques et sur l'expérimentation : cela prendra une grande partie du XVIII^e siècle⁹. Les institutions comme la *Royal Society of London* en Angleterre et l'Académie des sciences en France jouent dans ce processus un rôle fort important, souligné par le texte suivant¹⁰ qui date de 1746 :

« L'observation est le moyen le plus sûr pour réussir la recherche des choses naturelles, aussi l'Académie qui a fait tant de progrès dans cette utile recherche, reçoit-elle plus volontiers les observations que les raisonnemens, sur-tout lorsque les raisonnemens sont dépourvus d'observations. »

Cette évolution est pratiquement terminée au moment de la Révolution française. Les observations sont devenues quantitatives, et on commence à les formaliser en inventant un langage approprié permettant de les représenter ; il ne reste plus qu'à en faire des tables et surtout des graphiques, ce qui prendra encore beaucoup de temps. Voici ce que dit en 1784 Lavoisier (figure 1.7) de ce langage scientifique spécialisé dans son éloge de Bergman, chimiste suédois qui a été l'un des premiers à essayer de créer un tel langage¹¹ :

« Il a eu [...] l'idée absolument nouvelle d'exprimer, par des espèces de formules, toutes les opérations chimiques. [...] Cette espèce de langue nouvelle mérite l'attention des philosophes ; le moment approche où la langue alphabétique ne sera plus ni assez rapide, ni assez riche, ni assez précise,



Figure 1.7. Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794).

pour répondre aux besoins des sciences & suivre leur progrès ; elles seront forcées de s'arrêter, ou il faudra créer pour chacune une langue dans laquelle des signes invariablement déterminés, expriment les objets de nos connoissances, les diverses combinaisons de nos idées, les opérations auxquelles nous soumettons la nature, & celles que nous exécutons sur nos propres idées, qui soient enfin pour tous les genres de sciences, mais avec plus de perfection encore, ce que la langue de l'algèbre est pour l'analyse mathématique. »

On sait aussi, pour avancer, renoncer provisoirement à la recherche des causes, recherche que l'on perçoit souvent comme impossible alors qu'elle avait presque exclusivement occupé, avec la construction de systèmes abstraits, les « philosophes » ou « métaphysiciens » des époques précédentes. Par exemple, en 1788, Charles de Coulomb écrit¹² :

« Quelle que soit la cause de l'électricité, l'on en expliquera tous les phénomènes, & le calcul se trouvera conforme aux résultats des expériences, en supposant deux fluides électriques, les parties du même fluide se repoussant en raison inverse du carré des distances, & attirant les parties de l'autre fluide dans la même raison inverse du carré des distances.[...] Je prévien, pour mettre la théorie qui va suivre, à l'abri de toute dispute systématique, que dans la supposition de deux fluides électriques, je n'ai d'autre intention que de présenter avec le moins d'éléments possible, les résultats du calcul et de l'expérience, & non d'indiquer les véritables causes de l'électricité. »

Enfin, il s'est créé une véritable communauté scientifique, telle qu'elle va se manifester par la création spontanée de la Société d'Arcueil. Citons encore Lavoisier, dans son *Traité de chimie*¹³ :

« Si quelquefois il a pu m'échapper d'adopter, sans les citer, les expériences ou les opinions de M. Berthollet, de M. de Fourcroy, de M. de Laplace, de M. Monge et de ceux, en général, qui ont adopté les mêmes principes que moi, c'est que l'habitude de vivre ensemble, de nous communiquer nos idées, nos observations, notre manière de voir, a établi entre nous une sorte de communauté d'opinions, dans laquelle il nous est souvent difficile à nous-mêmes de distinguer ce qui nous appartient plus particulièrement. »

Tout est donc prêt pour la moisson de découvertes que connaîtront les décennies suivantes.

Science et société

Ce n'est qu'assez récemment que s'est développée dans le grand public une certaine suspicion vis-à-vis de la science et de la technique, bien que certaines des raisons de cette suspicion — les effets destructeurs des armes rendues de plus en plus sophistiquées grâce à la science — aient existé depuis toujours. Le problème ne se posait pas autrefois. L'attitude de la société en face de la science a néanmoins considérablement évolué à partir de la Révolution française. Au XVIII^e siècle, les encyclopédistes avaient créé un grand mouvement pour promouvoir la science et la technique, mais ils n'avaient touché qu'une élite assez restreinte, élite dont faisaient partie les spectateurs des expériences que l'on menait alors dans les cabinets de physique. Les savants formaient un groupe social isolé, dont l'influence ne s'étendait pas au-delà de ce public éclairé. Le peuple les ignorait, et aussi le plus souvent les hautes classes de la société, par manque d'éducation appropriée et d'éducation tout court. Enfin la bourgeoisie s'intéressait beaucoup plus à la philosophie qu'aux réalisations des scientifiques. Il existait bien une certaine hostilité larvée à l'égard des savants : elle n'était pas due à la nature de leur activité mais plutôt au fait qu'ils paraissaient constituer une caste privilégiée.

C'est à la fin du XVIII^e siècle et au début du XIX^e que l'intérêt pour la science et la technique se répand auprès d'un public bien plus vaste. Les causes en sont multiples. L'enseignement secondaire délivré dans les écoles centrales commence à façonner une large élite cultivée capable de comprendre des notions quelque peu abstraites ; à un niveau plus élevé, les grandes écoles forment un grand nombre de savants d'extraction souvent modeste, dont l'exemple ne peut manquer d'impressionner la nation tout entière. D'autre part, les applications des découvertes scientifiques commencent peu à peu à transformer la vie quotidienne. Le blocus continental de 1806-1808 oblige la France à vivre en autarcie, et donc à développer des techniques permettant de fabriquer des produits précédemment importés (un exemple bien connu est l'extraction du sucre de la betterave, substitut de la canne à sucre). La chimie commence à trouver des applications industrielles, en particulier grâce à Berthollet, et la machine à vapeur née en Angleterre apparaît timidement dans notre pays.

Il ne faut pas sous-estimer le rôle personnel de Bonaparte dans le développement scientifique et technique de la France. Bonaparte est féru de science, un goût peut-être contracté lors de ses études d'artillerie à Brienne. On a vu qu'il a emmené avec lui, dans l'expédition d'Égypte de 1798-1799, les savants confirmés qu'étaient Monge et Berthollet, mais aussi un grand nombre de jeunes scientifiques enthousiastes dont le travail remarquable a eu un grand retentissement. Il s'est fait élire dès 1796, nous l'avons vu, dans la section de mécanique de la Première classe de l'Institut de France ; une élection certes forcée, mais qui va se révéler bénéfique pour l'institution et pour la science en général. Suivant attentivement les progrès scientifiques et techniques, Bonaparte, devenu Napoléon I^{er}, distribue tout au long de son règne des subventions fort utiles pour la recherche, et finance différents appareils coûteux, comme la grande pile électrique de l'École polytechnique. Même si les rois qui lui succéderont seront beaucoup moins férus de science, le mouvement est lancé. Napoléon III, peut-être inspiré par l'attitude positive de son oncle aura, lui, beaucoup d'intérêt pour la science.

Malgré tout, l'intrusion des machines dans la vie quotidienne au début du XIX^e siècle n'est pas toujours perçue favorablement. Les ouvriers voient d'emblée dans ces machines des rivales susceptibles de les remplacer et de les mettre ainsi au chômage, et les industriels sont initialement pleins de méfiance : nous verrons, au chapitre 11, Arago exercer toute sa force de persuasion pour promouvoir le machinisme, en essayant d'en démontrer les aspects positifs. Mais la tendance est irréversible. On constate d'ailleurs bientôt que les inventions peuvent réellement rendre la vie plus confortable et apporter de la richesse. La considération pour les travaux des savants va parallèlement en croissant ; la fraction la plus cultivée du public admire celles des découvertes qu'il peut ou croit comprendre, comme en physique celles de Fresnel ou d'Ampère pour ne parler que des Français. On s'enthousiasme aussi pour les découvertes de fossiles d'animaux disparus et l'on participe aux controverses que suscitent les premières idées évolutionnistes de Jean-Baptiste de Lamarck et d'Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, auxquelles s'oppose Georges Cuvier.

Il y a donc une demande pressante du public pour s'instruire sur la science et la technique. Bien entendu, les journalistes s'emploient à la satisfaire en insérant

dans leurs publications des comptes rendus des travaux présentés à l'Académie des sciences : c'est ainsi que l'on trouve un « feuilleton » scientifique dans le quotidien *Le Globe* à partir de 1825, puis après 1829 dans le *Journal des Débats*, qui a d'ailleurs publié des articles scientifiques dès sa fondation en 1789. En 1830, la plupart des journaux quotidiens parlent de science en bonne place. Cette vulgarisation n'est pas du goût de tous les scientifiques, et l'un des tout-puissants secrétaires perpétuels, Cuvier, expulsera des séances de l'Académie certaines personnes qui ont eu l'audace d'organiser des fuites d'information. Sans doute ces savants-là préfèrent-ils rester dans leur confortable tour d'ivoire. C'est une tendance que l'autre secrétaire perpétuel qu'est Arago va combattre avec succès du vivant même de Cuvier.

Le financement de la recherche

À l'époque qui nous intéresse, le financement de la recherche est fort différent de celui que nous connaissons aujourd'hui. Il vaut mieux être riche pour être chercheur ! C'était le cas de Laplace, et aussi de Lavoisier, qui a monté à ses frais le magnifique laboratoire de chimie dont les éléments se trouvent aujourd'hui au Musée des arts et métiers à Paris, mais qui a payé de sa tête la fortune qu'il avait acquise en tant que fermier général. Plus tard, Hippolyte Fizeau financera de ses propres deniers l'appareil, construit par Paul-Gustave Froment, qui lui servira à mesurer la vitesse de la lumière en 1849, et de même Léon Foucault son miroir tournant et son premier pendule dus au même Froment en 1850 et 1851 : des dispositifs très onéreux car d'une très grande qualité d'exécution, qui nécessitent un long travail^c.

Il est aussi possible de solliciter la faveur du roi ou d'un riche personnage. C'est ainsi que Pierre Charles Le Monnier a obtenu de Louis XV, grand amateur de science, l'équipement d'un observatoire personnel qui pouvait rivaliser avec l'Observatoire de Paris, lequel a d'ailleurs acheté plusieurs instruments à ses héritiers. Louis XV a également financé un observatoire à la Muette, dont certains éléments ont été dévolus à l'Observatoire de Paris pendant la Révolution. Ce mécénat va continuer occasionnellement au XIX^e siècle sous la forme de prix et

^c Un gyroscope valait environ 2 500 francs de l'époque.

d'« encouragements » d'un montant souvent considérable, financés par de riches personnages, que l'Académie des sciences est chargée d'affecter sur concours ; quelques autres proviennent des fonds propres de l'Académie. Enfin, les savants qui ont la chance d'appartenir à des institutions comme l'École polytechnique ou le Bureau des longitudes peuvent voir leur matériel d'expérience financé sur le budget de ces institutions : c'est le cas d'Ampère, répétiteur à l'École polytechnique, et d'Arago lui-même qui, devenu Directeur des observations de l'Observatoire de Paris en 1834, peut faire réaliser par Louis Breguet, aux frais du Bureau des longitudes, des miroirs tournants pour ses expériences sur la vitesse de la lumière.

Les institutions savantes versent un salaire à leurs membres. Nous avons vu que c'est le cas pour le Bureau des longitudes ; les professeurs et répétiteurs dans les grandes écoles sont également payés. L'Institut national donne annuellement 1 200 francs à ses membres. Une fois entré dans le système, on peut cumuler. En 1816, Arago reçoit annuellement 9 700 francs, réduits à 8 200 francs après le « licenciement de l'école Royale Polytechnique » et rétablis ensuite (figure 1.8).

Après 1830, il reçoit 6 500 francs annuels du Bureau des longitudes, 6 000 francs de l'Académie des sciences en tant que secrétaire perpétuel et des émoluments de 3 800 francs comme examinateur à l'École d'artillerie de Metz, disposant donc au total de 16 300 francs par an^d ; il a alors renoncé à son poste de professeur à l'École polytechnique « pour ne pas être accusé de cumuler de gros traitements »¹⁴. Ses fonctions de député et de conseiller municipal de Paris ne sont pas rémunérées, et il refusera la rémunération attachée à ses brèves fonctions ministérielles pendant la seconde République. Mais tout le monde n'a pas la chance d'Arago. Il s'est d'ailleurs inquiété d'une menace qui pèse sur les cumuls, en publiant un petit article¹⁵ qu'il présente ainsi :

« Pendant la seconde Restauration, les savants, les hommes de lettres, les artistes furent tous menacés dans leur existence. Des députés [...] annoncèrent l'intention de faire décider qu'un savant n'occuperait jamais plus d'un emploi ; c'était

^d À titre de comparaison, un kilogramme de pain valait entre 25 et 40 centimes, un litre de lait 50 centimes, un livre de l'ordre de 6 francs et l'abonnement annuel à un quotidien, considéré comme très cher, de 60 à 70 francs. On peut donc évaluer à près de 3 euros le franc de la première moitié du XIX^e siècle.

20

Etat des Emplacements dont jouit M^r Arago

Membre adjoint du Bureau des Longitudes (spécialement chargé du cours public d'Astronomie qui se fait tous les ans à l'Observatoire Royal.)	5500 francs
Professeur adjoint à l'école Polytechnique	3000
Membre de l'Institut (traitements fixes)	1200
Total —————	
	9700 francs

Depuis le licenciement de l'école Royale Polytechnique, le traitement de professeur adjoint a été réduit à 1500 francs.

Paris le 1^{er} juin 1816.

F. Arago

Figure 1.8. Traitements d'Arago en 1816 (manuscrit autographe).

porter à 5 000 francs [annuels] le maximum de fortune qu'il eut été possible d'atteindre, puisque les emplois les plus élevés dans l'ordre scientifique ne comportent que très-rarement une rétribution annuelle supérieure à ce chiffre. [...] Il était important d'éclairer les députés. [...] Je me chargeai de ce soin, et peu touché du reproche qu'eussent pu m'adresser ceux de qui j'étais peu connu, d'agir dans un intérêt privé plutôt que dans celui de la science, je me rendis successivement chez les orateurs les plus éminents de la Chambre ; j'eus le bonheur, entre autres, d'intéresser à cette cause Benjamin Constant, qui me promit de stigmatiser comme il savait le faire ce projet d'irruption de la barbarie dans le domaine de l'intelligence. Loin de reculer devant les attaques dirigées contre les cumulards, j'écrivis alors un petit article. [...] Je reproduis cet écrit, dont des circonstances particulières, indépendantes de ma volonté, ont retardé la publication, comme une sorte de conclusion de mes études biographiques. [...] »

L'article lui-même se termine ainsi :

« EN CONCLUSION : Réduisant la question, si l'on veut, à ses termes les plus vulgaires, nous pourrions nous écrier : Celui qui n'est rétribué qu'à raison de son titre de professeur, a rempli son devoir par cela seul qu'il a fait sa leçon ; celui, au contraire, qui ne recevrait son salaire que pour faire progresser la science, serait le débiteur de l'État lorsque, dans l'année, il n'aurait pas attaché son nom à une découverte. Or, un homme d'honneur, et cette qualification, nous aimons à nous le persuader, appartient toujours à l'homme de génie, tiendra scrupuleusement à payer ses dettes. »

Arago a bien vu que certains professeurs d'Université ne font que leur cours et pas de recherche ; il prône donc le financement de chercheurs à temps plein. Peut-être pense-t-il à son ami Ampère, chercheur brillant mais enseignant médiocre, qui a dû accepter pour vivre, après ses grandes découvertes en électromagnétisme, un poste d'inspecteur qui ne lui convient guère et lui prend tout son temps.

Les publications

Depuis longtemps, les savants peuvent publier les résultats de leur recherche dans des journaux spécialisés, par exemple le *Journal des Sçavans* créé au xvii^e siècle mais qui a cessé de paraître en 1789, et directement ou indirectement dans l'Histoire de l'Académie royale des sciences et les mémoires qui y sont insérés. La *Connaissance des*

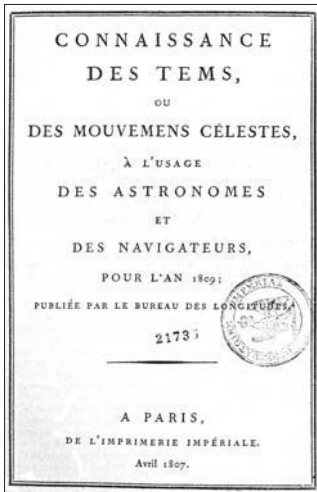


Figure 1.9. Page de titre de la *Connaissance des temps*.



Figure 1.10. Jérôme de Lalande (1732-1807).

*temps ou des mouvements célestes*¹⁶, un journal annuel fondé en 1679, contient non seulement des éphémérides astronomiques et nautiques pour l'année suivante, mais aussi des articles de fond sous la forme d'un volume d'additions dont l'achat est optionnel (figure 1.9). Devenue l'organe du Bureau des longitudes à sa fondation en 1795, la *Connaissance des temps* a alors pour rédacteur en chef Lalande (figure 1.10), auquel succède Delambre (figure 1.11) en 1808. Les observations faites à l'Observatoire de Paris (jusqu'en 1809) et des observations faites dans d'autres observatoires sont publiées dans le volume supplémentaire de la *Connaissance des temps*. Ce volume contient jusqu'en 1808 une *Histoire de l'astronomie* pour une des années précédant la publication, d'abord rédigée par Lalande pour laquelle elle se résume à une simple énumération de faits, puis par Delambre qui y place ses propres réflexions sur des sujets d'actualité.

À côté de la *Connaissance des temps*, on trouve l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* (figure 1.12), un petit volume annuel

« extrait de la *Connaissance des Temps*, et qui contient tout ce qui est utile au public, dans une petite étendue, pour être à la portée de tout le monde, et parvenir facilement, et en nombre suffisant, dans toutes les parties de la République ».

C'est dans cet annuaire qu'Arago va publier les nombreuses Notices scientifiques dont nous reparlerons au chapitre 11, notices qui sont d'excellents exemples de vulgarisation scientifique et qui contiennent quelquefois des développements originaux.

L'Académie des sciences a ses propres publications scientifiques, sous la forme des Mémoires qui ont succédé à partir de 1790 à l'Histoire de l'Académie royale des sciences. Ces mémoires ne paraissent, nous l'avons vu, que plusieurs années après qu'ils aient été approuvés par la commission chargée de leur examen. C'est une des raisons pour lesquelles Arago a convaincu l'Académie de publier à partir de 1835 les *Comptes rendus des séances hebdomadaires de l'Académie des sciences*, qui subsistent aujourd'hui. La Royal Society de Londres est mieux organisée, car elle publie depuis très longtemps ses mémoires bien plus rapidement que l'Académie de sciences dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, qui sont beaucoup lus à l'étranger.

À côté de ces journaux à caractère officiel, on trouve des publications propres aux grandes écoles, dont la plus

lue est certainement le *Journal de l'École polytechnique*. Il y a aussi des journaux scientifiques édités par des particuliers à leur bénéfice, comme les *Observations et Mémoires sur la Physique, sur l'Histoire naturelle, et sur les Arts et Métiers*, journal fondé en 1771 par l'abbé Rozier, auquel a succédé en 1780 l'abbé Mongès le Jeune, parti en 1785 avec l'expédition de La Pérouse. C'est un médecin, Jean-Claude Delamétherie, qui reprend provisoirement le journal en 1785, puis définitivement après la disparition de Mongès le Jeune en 1788. Henri-Marie Ducrotay de Blainville lui succède à sa mort en 1817, mais le journal, devenu sous la Révolution le *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, périclité et cesse de paraître en 1823. Il est vrai qu'il est fortement concurrencé par les *Annales de chimie et de physique*, fondées en 1816 par Arago et Berthollet, qui sont d'une toute autre tenue et publient sous forme de résumés ou d'extraits les résultats les plus intéressants de l'époque (figure 1.13). Ces journaux ont un ton très personnel : le *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts* commence chaque année par un « Discours préliminaire » de Delamétherie puis de Ducrotay de Blainville, long d'une centaine de pages, où sont résumés de façon compétente les travaux scientifiques de l'année précédente. Dans les *Annales de chimie et de physique*, on retrouve continuellement la plume d'Arago, y compris dans des articles, notes et remarques non signés, et il est évident que les articles sont sélectionnés selon les goûts, au demeurant excellents, des deux rédacteurs en chef.

Dans tous ces journaux, on trouve le souci de vulgarisation de la science qui anime Arago dans ses *Notices scientifiques*. C'est dans un but explicite de vulgarisation qu'a été créé pendant la Révolution le *Bulletin des Sciences de la Société philomathique de Paris*, dont il est intéressant de citer le début de la préface¹⁷ :

« L'objet de ce Journal est de faire connoître promptement, laconiquement, quoique complètement, et pour un prix modique, les travaux et les découvertes des savans.

Ce journal convient par sa précision aux personnes qui, voulant être au courant des progrès de la science, n'ont cependant pas le tems de lire tous les mémoires qui sont étrangers à celle qu'elles cultivoient particulièrement.

Il convient par la modicité de son prix aux jeunes étudiants, qui ne peuvent se procurer chacun des journaux consacrés à une seule science.[...]



Figure 1.11. Jean-Baptiste Delambre (1749-1822).



Figure 1.12. Page de titre de l'Annuaire du Bureau des longitudes.

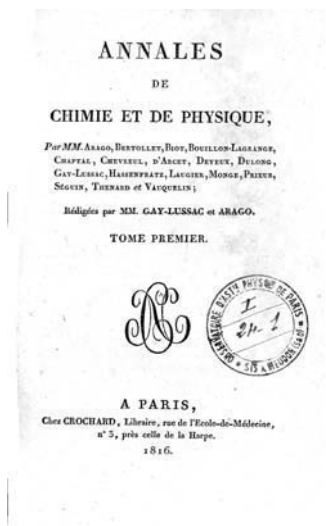


Figure 1.13. Page de titre du premier numéro des *Annales de chimie et de physique*.

La Société exclut sévèrement du Bulletin des Sciences, tous les mémoires qui ne contiennent que des dissertations, des théories vagues, des plans de travaux, etc. Elle n'admet que ceux qui renferment des faits, des observations, ou des idées intéressantes et nouvelles ; enfin, lorsque l'espace le permet, le Journal est terminé par l'annonce et l'extrait des ouvrages nouveaux et les plus importants pour les sciences. »

C'est dans un souci analogue que l'on trouve, dans chaque volume de la *Connaissance des temps* et des *Mémoires de l'Académie des sciences*, une « Histoire » rédigée par un des grands noms de l'époque, qui est un résumé accessible aux esprits cultivés des recherches de l'année précédente. Des journaux du même genre existent à l'étranger. Particulièrement intéressante pour l'historien est la *Bibliothèque universelle de Genève*, qui couvre différentes disciplines avec une prédilection pour la physique : y trônent les physiciens Charles Gaspard De La Rive et son fils Auguste.

On ne sera pas surpris de constater beaucoup de recouvrements entre ces publications : lorsqu'un événement scientifique important survient, chaque journal en rend compte de façon plus ou moins approfondie et essaye d'obtenir un texte de l'auteur. Ici la palme revient incontestablement aux *Annales de chimie et de physique*, car il est difficile aux savants de résister aux sollicitations d'Arago et de Berthollet. On y trouve en primeur l'essentiel des textes de Fresnel, d'Ampère, de Dulong et de Petit, de Fourier, souvent de Biot, ainsi que des articles de Humboldt et des meilleurs physiciens et astronomes de l'époque, dont bien entendu Arago lui-même ; le plus souvent, ces textes viennent juste d'être lus devant l'Académie des sciences ou la Société philomathique. C'est aussi pour les scientifiques une manière de court-circuiter la publication dans les *Mémoires de l'Académie des sciences*. L'apparition des *Comptes rendus* en 1835 va réduire progressivement l'impact des *Annales*, mais on y trouve encore, bien des années après, des articles originaux intéressants, principalement des mémoires assez longs qui ne trouvent pas leur place dans les *Comptes rendus*.

Une science internationale

Une caractéristique frappante des journaux scientifiques à l'époque qui nous intéresse est le nombre important

d'articles étrangers traduits en français, ou de comptes rendus plus ou moins substantiels de recherches faites à l'étranger. Clairement, rien de ce qui se passe d'important en Angleterre, en Allemagne, en Italie, au Danemark ou en Suède n'est ignoré des scientifiques de notre pays. La manière dont leurs collègues étrangers sont cités et appréciés ne laisse pas apparaître un quelconque nationalisme. Par exemple, les travaux de William Herschel en astronomie font l'objet de résumés très conséquents dans plusieurs publications, par exemple dans les « Discours préliminaires » insérés par Delamétherie dans son *Journal de physique*¹⁸. Le même journal reproduit également en traduction un grand article de Herschel sur les nébuleuses et les « amas de nébuleuses », avec deux planches redessinées pour l'occasion¹⁹, et quelques articles de savants étrangers comme Alessandro Volta²⁰.

Les autres publications scientifiques françaises ne sont pas en reste. La *Connaissance des temps* publie des tables astronomiques construites par Herschel et d'autres astronomes étrangers, et ne manque pas de mentionner de façon très élogieuse les découvertes importantes faites à l'étranger, comme celle de la petite planète Cérès par l'italien Giuseppe Piazzi en 1801 ou celle de l'astéroïde Pallas par l'allemand Heinrich Olbers l'année suivante. De même, les opérations géodésiques à l'étranger y sont décrites, souvent avec un grand luxe de détails²¹. Les *Annales de chimie et de physique* et la *Bibliothèque universelle de Genève* publient, souvent *in extenso*, la traduction française d'articles fondamentaux comme celui d'Ørsted²², écrit en latin, qui relate sa découverte de l'action d'un courant sur une aiguille aimantée^e. Quelques articles d'origine étrangère n'ont pas le même niveau, mais on constate rétrospectivement que la perspicacité des rédacteurs en chef a été en général très bonne.

^e On trouve en note de l'article des *Annales*, de la main d'Arago : « Cet article, qui doit paraître dans le prochain Cahier de la Bibliothèque universelle, m'a été communiqué, à Genève, par M. Pictet ; depuis, plusieurs savans de Paris l'ont aussi reçu directement de l'auteur. Les lecteurs des *Annales* auront remarqué que nous n'accueillons pas, en général, trop à la légère, les annonces des découvertes extraordinaires, et jusqu'ici nous n'avons eu qu'à nous applaudir de cette réserve ; mais à l'égard du Mémoire de M. Ørsted, les résultats qu'il renferme, quelque singuliers qu'ils puissent paraître, sont accompagnés de trop de détails pour donner lieu à aucun soupçon d'erreur. » Il est vrai qu'Arago avait vu lui-même l'expérience à Genève.

Il faut noter que les relations scientifiques entre la France et les pays étrangers ignorent superbement les conflits et les guerres. Les collaborations continuent dans toute la mesure du possible, de même que les citations de travaux étrangers. Certains étrangers, comme l'astronome autrichien Bürg en 1802, reçoivent à une époque troublée des prix de l'Académie des sciences d'un montant élevé (15 400 francs au total dans ce cas). Les seules remarques que l'on trouve au sujet des relations scientifiques internationales concernent les difficultés de communication : il n'est pas toujours facile ni même possible de se procurer les articles ou les livres des savants étrangers, ce que regrette Delambre dans l'introduction de son compte rendu d'un ouvrage sur la triangulation en trois tomes²³ parus en Angleterre en 1799, 1801 et 1811 :

« *La difficulté des communications a fait [que ces volumes] ont été long-tems inconnus à Paris, ensorte [sic] que nous avons été dans l'impossibilité de les annoncer plutôt [sic]*²⁴. »

D'autres n'ont pas eu ces difficultés ou ont fait plus d'efforts, comme Delamétherie qui relate les travaux d'Herschel pendant toute la durée du règne de Napoléon I^{er}, alors que la France est au plus mal avec l'Angleterre.

Chapitre 2

La vie d'Arago



Portrait d'Arago,
frontispice du t. 13
des *Œuvres complètes*.



Le paraphe de la signature,
vue dans un miroir,
reproduit le nom d'Arago.

La vie d'Arago et des membres de sa famille ayant été très bien décrite dans les ouvrages de Maurice Daumas¹ et de François Sarda², qui sont actuellement disponibles et auxquels nous sommes fortement redevables, nous n'en donnerons ici qu'un bref résumé³. On trouvera dans l'appendice 1 un aperçu synthétique, avec mention de ceux des événements de l'époque qui sont les plus significatifs pour François Arago. Pour l'histoire de la France de la Restauration au Second Empire, nous avons souvent consulté les petits ouvrages clairs et complets de Jean-Claude Caron et de Jean Garrigues⁴.

La famille Arago

Dominique *François*^a Arago est né le 26 février 1786 à Estagel (Pyrénées-Orientales), gros bourg situé à 25 kilomètres de Perpignan. Il était le second de huit enfants vivants (trois autres étaient morts en bas âge). Son père, François Raymond *Bonaventure* Arago (1754-1814), était un paysan aisé et instruit, qui avait obtenu le titre de bachelier en droit à l'Université de Perpignan. Il géra Estagel dès avant la Révolution et rédigea le cahier de doléances de la commune. Élu maire de sa commune puis juge de paix du canton en 1790, il abandonna cette dernière fonction pour devenir membre du Directoire exécutif du département en 1792 : pour peu de temps, car il renonça à ce mandat à la chute de la monarchie, à la fin de cette même année, pour se retirer à Estagel. La Convention ayant déclaré la guerre au roi d'Espagne, qui était solidaire des Bourbons éliminés du trône de France, Bonaventure prit une part active à la résistance contre les Espagnols qui avaient envahi la moitié du Roussillon, et qui en furent finalement chassés ; en récompense des services rendus, on le pria de réintégrer le Directoire départemental, dont il prit la présidence après la Terreur qui avait frappé durement la région. En 1796, toute la famille déménagea à Perpignan, où venaient d'être créés un collège et une école centrale : le jeune François y poursuivit ses études. Son père fut nommé Caissier de la Monnaie de Perpignan en 1797, poste important encore qu'assez mal rémunéré qu'il occupa jusqu'à sa retraite en 1813. Il était

^a Le prénom usuel est en italiques.

au centre de la vie intellectuelle de la ville, recevant Pierre-André Méchain à son passage en route vers l'Espagne où il devait continuer la mesure du méridien, puis le « géomètre » (mathématicien) Jean-Nicolas Hachette venu donner des cours d'hydrographie à Port-Vendres et à Collioure. Méchain a certainement impressionné le jeune François ; par ailleurs, l'amitié entre son père et Hachette lui a été utile puisque François fut accueilli par ce dernier à son arrivée à Paris, et logea chez lui. Bonaventure ne profita pas longtemps de sa retraite puisqu'il mourut à la fin de 1814, sans avoir vécu les Cent-Jours.

Bonaventure Arago avait épousé en 1778 Marie Roig, fille d'un paysan aisé de la région. C'était une femme solide, accueillante et généreuse, très attachée à la religion qu'elle ne réussit cependant pas à imposer à plusieurs de ses enfants, dont François. Après le décès de son mari, elle retourna à Estagel où elle vécut une existence calme, illuminée par les visites de sa famille qui lui était très attachée, et aussi par le séjour dans sa maison d'amis prestigieux comme le sculpteur Pierre-Jean David d'Angers, qui réalisa son buste et celui de François Arago, et comme le physicien Félix Savary qui s'y retira et y mourut en 1841.

Il n'est pas sans intérêt de dire quelques mots des frères et sœurs de François Arago, dont plusieurs jouèrent un rôle important et exercèrent leur influence sur lui. Toute cette fratrie était très liée et les occasions de s'entraider ne lui manquèrent pas : c'était, de son vivant, surtout le fait de François, dont la notoriété était très grande. Nous ajouterons une brève biographie de deux fils de François, Emmanuel et Alfred : la vie politique du premier a été en effet mêlée à celle de son père et de son oncle Étienne.

Marie-Rose Émeranciane (1782-1832) était l'aînée des enfants survivants de Bonaventure Arago et de Marie Roig. Elle est restée jusqu'en 1812 au foyer familial, qu'elle a quitté pour épouser un paysan aisé d'Estagel dont elle eut quatre filles.

Jean Martin (1788-1836) a fait une carrière militaire, d'abord en France, puis au Mexique où il émigra en 1816. Il eut la chance d'y traverser sans encombre une période très troublée, devenant même général en 1832. Il mourut du paludisme en 1836, seul et pauvre, sans laisser de descendance.

Jacques Étienne Victor (1790-1854) était brillant et excentrique. Marié à 19 ans et vite père de deux enfants, il abandonna sa famille pour parcourir, le crayon à la

main, tout le bassin méditerranéen, puis le monde entier. Devenu aveugle en raison d'un diabète congénital qui atteindra également ses frères François et Joseph et sa sœur Marguerite, il s'embarqua en 1849 pour le Brésil où il mourut en 1854 après être revenu plusieurs fois en France.

Victor Jean (1792-1867) est entré comme François à l'École polytechnique, à l'âge de 19 ans, pour embrasser une carrière militaire marquée par une action éclatante lors du siège d'Anvers en 1832. Il a cependant terminé sa carrière de façon modeste et discrète.

Joseph Honoré (1796-1860), après des débuts modestes dans la carrière militaire, fut attiré au Mexique par son frère Jean. Devenu aveugle en raison du diabète, il y mourut ayant atteint le grade de colonel.

Marie Thérèse Gaudérique Marguerite (1798-1859) occupe une place de choix dans la dynastie des Arago. En raison des graves déboires financiers de la famille à Perpignan après la Restauration, François fit venir en 1820 à l'Observatoire de Paris les deux cadets, Marguerite et Étienne. Marguerite y rencontra un astronome déjà fort connu, Claude-Louis Mathieu, qui avait trois ans de plus que François et était encore célibataire. Elle l'épousa en 1824. À la mort de la femme de François en 1829, Marguerite prit en charge les trois enfants du couple. De leur côté, les Mathieu avaient deux enfants, dont une fille, Lucie, née en 1823. Celle-ci épousa en 1843 un autre astronome de l'Observatoire, Ernest Laugier. Il semble que Marguerite et Lucie, toutes deux républicaines convaincues, aient exercé une certaine influence politique sur François qui les aimait beaucoup. Quant à Lucie, elle fut sa secrétaire lorsque, devenu presque aveugle, il ne pouvait plus écrire.

Étienne Vincent (1802-1892) (figure 2.1)⁵ est certainement avec François le personnage le plus remarquable de la fratrie. Au cours de sa longue existence, il fut un acteur important de la vie politique et culturelle du XIX^e siècle. Après des études inachevées, il fut, nous venons de le voir, accueilli à l'Observatoire en 1820 avec sa sœur Marguerite. François lui trouva bientôt, après un rapide complément de formation, un emploi de préparateur en chimie auprès de Gay-Lussac à l'École polytechnique. Puis il embrassa une carrière politico-littéraire. Révolutionnaire ardent, républicain de toujours, il joua un rôle majeur pendant la Révolution de 1830, alors qu'il dirigeait le théâtre du



Figure 2.1. Étienne Arago (1802-1892).

Vaudeville qui fut, selon lui, le premier établissement public à donner le signal de la révolte^b. Il ne fut pas long à dénoncer les excès de Louis-Philippe, mis sur le trône à la suite de cette révolution, et à affirmer sa foi républicaine alors que son frère François attendit la Révolution de 1848 pour se rallier définitivement à cette idée. On ne s'étonnera pas qu'Étienne ait pris une part très active aux émeutes de 1834 à Paris et à Lyon, puis à la Révolution de 1848. Autoproclamé ministre des Postes pendant l'éphémère II^e République qui suivit, il réorganisa cette administration avec efficacité dans un esprit social et introduisit en France le timbre-poste inventé en Angleterre. Il se fit élire à la Chambre des députés, où il retrouva François et son fils Emmanuel, et même Mathieu, élu en Saône-et-Loire avec Alphonse de Lamartine. Après l'élection le 10 décembre 1848 à la présidence de la République de l'« homme providentiel » que prétendait être Louis Napoléon Bonaparte, le futur Napoléon III, Étienne s'exila en Belgique en 1849. Il y resta jusqu'à son retour en France en 1859, après l'amnistie générale. Reprenant du service en 1870, Étienne se retrouva maire de Paris pendant le siège de la ville par les Prussiens. Démissionnaire sous la Commune dont il désapprouvait les excès, il vécut quelque temps de la vente de la collection de tableaux et de dessins qu'il avait amassée en Belgique et ailleurs, et termina sa vie comme conservateur du Musée du Luxembourg.

François Victor Emmanuel (1812-1896) (figure 2.2) était l'aîné des trois fils de François Arago. Après une enfance sans problème, il entra en littérature sous l'influence de son oncle Étienne, écrivant des vers et des pièces de théâtre. Devenu avocat, il s'occupa de litiges sur les brevets d'invention — un domaine que connaissait bien son père — ce qui assurait le quotidien. Mais il se préoccupait surtout de défendre ses amis politiques comme Armand Barbès et Alexandre Auguste Ledru-Rollin. En 1848, il se joignit à la Révolution puis fut nommé commissaire de la jeune République à Lyon. Dépassé par les événements qui furent particulièrement violents dans cette ville, il fut rappelé à Paris. Ceci ne l'empêcha pas d'être élu député des Pyrénées-Orientales en même temps qu'Étienne, et d'être presque aussitôt envoyé comme ambassadeur à Berlin.

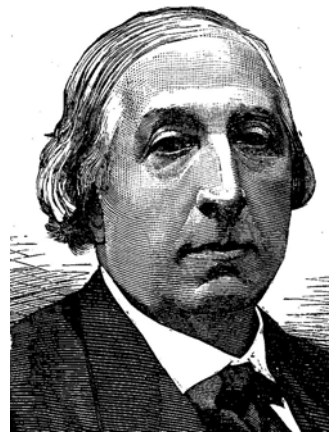


Figure 2.2. Emmanuel Arago (1812-1896).

^b On dit que le personnage avec un chapeau haut de forme qui figure sur le célèbre tableau de Delacroix « La liberté guidant le peuple » serait Étienne Arago.

Il y retrouva Humboldt, qui assura à François qu'il se comportait de manière « très convenable ». Après l'élection de Louis Napoléon Bonaparte, il démissionna de ses fonctions de député et d'ambassadeur. Il fut cependant réélu dans les Pyrénées-Orientales comme député de l'opposition en même temps que son père, et fut très actif jusqu'à la dissolution de l'Assemblée lors du coup d'État du 2 décembre 1851. Il continua alors à plaider avec succès, toujours dans des affaires de propriété industrielle mais aussi pour les opposants à l'Empire. Il retrouva Étienne en 1870 et fut nommé ministre de la Justice pendant le siège de Paris, puis pour quelque temps ministre de l'Intérieur. Réélu député en 1871 et devenu sénateur en 1875, il figura parmi les centristes. Il fut ambassadeur de France en Suisse, de 1880 à 1894, et mourut en 1896 dans l'estime générale des républicains.

Alfred (1815-1892), le deuxième fils de François Arago, fut un peintre apprécié de ses contemporains. Nommé Inspecteur général des beaux-arts en 1852, il devint un familier du salon de la Princesse Mathilde Bonaparte, où il se lia d'amitié avec Prosper Mérimée. Démissionnaire à la chute du Second Empire, il se retrouva directeur d'une entreprise de tabacs et termina en 1892 une vie sans histoire.

Quant au troisième et dernier enfant de François Arago, Gabriel, il est mort en 1832 à l'âge de 15 ans.

Les années de jeunesse (1786-1809)

Arago a raconté lui-même sa jeunesse dans un charmant petit ouvrage posthume, *l'Histoire de ma jeunesse*, écrit à la fin de sa vie et placé au début des *Œuvres complètes*⁶ par Jean-Augustin Barral, leur compilateur. Connaissant l'honnêteté d'Arago et son excellente mémoire, qu'il a conservée jusqu'à sa mort, il n'y a pas lieu de mettre en doute les grandes lignes de son récit, bien qu'il ait pu l'enjoliver dans quelques détails, en omettant notamment les contacts qu'il a pu avoir avec le reste du monde au cours de ses aventures rocambolesques.

Né le 26 février 1786, Arago est trop jeune pour avoir trempé dans ce qu'il appelle « les excès de notre première révolution ». Il n'en attaque pas moins à l'âge de sept ans quelques soldats espagnols égarés, parmi ceux qui ont alors envahi les Pyrénées-Orientales. L'affaire tournant

mal comme on pouvait s'y attendre, il est heureusement secouru par des villageois arrivés en renfort. C'est un premier témoignage de son caractère bouillant. Rien de marquant à signaler par ailleurs : des études moyennes, sauf en mathématiques, à l'école centrale de Perpignan, puis l'intervention d'un mathématicien amateur ami de son père, Hippolyte Raynal, qui l'aide dans ses études. Ayant rencontré un jeune officier en fringant uniforme, François Cellini de Creyssac, François se renseigne auprès de lui sur les moyens d'en arriver là et décide de se présenter à l'École polytechnique. Le concours d'entrée ne consiste qu'en une épreuve orale de mathématiques, aussi Arago se met-il à étudier « *les ouvrages les plus nouveaux*, [qu'il fait] *venir de Paris* », notamment un livre d'Adrien Marie Legendre. Après un premier essai, manqué par suite de la maladie de l'examinateur qui devait venir à Montpellier interroger les candidats, Arago se présente à nouveau l'année suivante, en 1803. Il a eu le temps d'étudier des ouvrages d'Euler et de Lagrange, ainsi que la Mécanique céleste de Laplace. Cette dernière lecture, et aussi la rencontre de Méchain à son passage à Perpignan, seront sans doute déterminantes pour la carrière astronomique d'Arago.

L'examinateur, à Toulouse cette fois, n'est autre que Legendre dont Arago connaît bien les œuvres. Il est reçu brillamment, le premier parmi les élèves qui se destinaient à l'artillerie^c. Il n'a que 17 ans, mais l'admission à un âge aussi peu élevé n'est pas exceptionnelle à l'époque. Arago dit de l'École

« qu'elle péchait moins par l'organisation que par le personnel ; que plusieurs des professeurs étaient fort au-dessous de leurs fonctions ».

La scolarité est gratuite, mais les élèves sont externes, logés chez des « pères sensibles » moyennant pension. François habite chez un ami de son père, Jean-Nicolas Hachette, professeur de géométrie à l'École et républicain fervent. Il fait la connaissance de Siméon-Denis Poisson, lui aussi géomètre, qui habite à côté et est également républicain. Ces opinions politiques sont alors fort répandues parmi les élèves de l'École, qui sont souvent d'origine modeste : il n'est pas étonnant qu'ils se refusent à adresser

^c Une légende prétend qu'il était premier au classement général ; il n'était que sixième.

à Napoléon les félicitations qu'il exige des corps constitués après son couronnement le 2 décembre 1804. Le général Lacuée, qui vient d'être nommé gouverneur de l'École, doit communiquer à l'Empereur la liste des meneurs, qui commence par Arago. Embarrassé, Napoléon lui dit :

« *Je ne chasse pas les premiers de promotion : ah ! s'ils avaient été à la queue... M. Lacuée, restez-en là.* »

Peu après, le poste de secrétaire-bibliothécaire du Bureau des longitudes se trouve libre à l'Observatoire de Paris. Sur les injonctions de Poisson et de Laplace, Arago l'accepte, à la condition de pouvoir revenir à l'artillerie si cela lui convient mieux. Bien que nommé à l'Observatoire le 25 janvier 1805 avec un appointement de 1 800 francs par an, il reste donc inscrit sur la liste des élèves de Polytechnique, et il y reste encore lorsqu'il est envoyé en Espagne l'année suivante (figure 2.3) ; mais il ne reviendra à l'École que comme enseignant.

Logé cette fois à l'Observatoire, il fréquente beaucoup Laplace, dont il parle avec un mélange d'admiration pour sa science et de désenchantement pour sa mesquinerie dans la vie quotidienne. Aussitôt après son entrée à l'Observatoire, Arago commence des observations astronomiques et travaille avec Biot (figure 2.4) sur la réfraction de la lumière dans les gaz, programme commencé autrefois par Charles de Borda. Il ne néglige pas pour autant son rôle de bibliothécaire, puisque deux mois après son arrivée, le Bureau des longitudes arrête, sans doute à sa demande, « *qu'aucun livre de la bibliothèque ne sera prêté à aucun membre sans une reconnaissance* ». Si Arago n'exerce sa fonction qu'un an, il se montrera toujours soucieux de conserver et d'enrichir le patrimoine déjà très important de l'Observatoire. En 1839, il fera don à l'Observatoire de 44 volumes manuscrits de Lalande qui lui avaient été offerts à titre personnel, et en 1848 il obtiendra de l'Académie des sciences la collection complète des *Comptes rendus* et des *Mémoires*.

L'odyssée catalane

Arago dit dans *l'Histoire de ma jeunesse* que Biot et lui ont proposé à Laplace de reprendre la triangulation du prolongement de la méridienne de Paris vers les Îles Baléares, interrompue en 1804 par la mort de Méchain, et d'y ajouter des mesures de gravité à l'aide d'un pendule. Ce projet

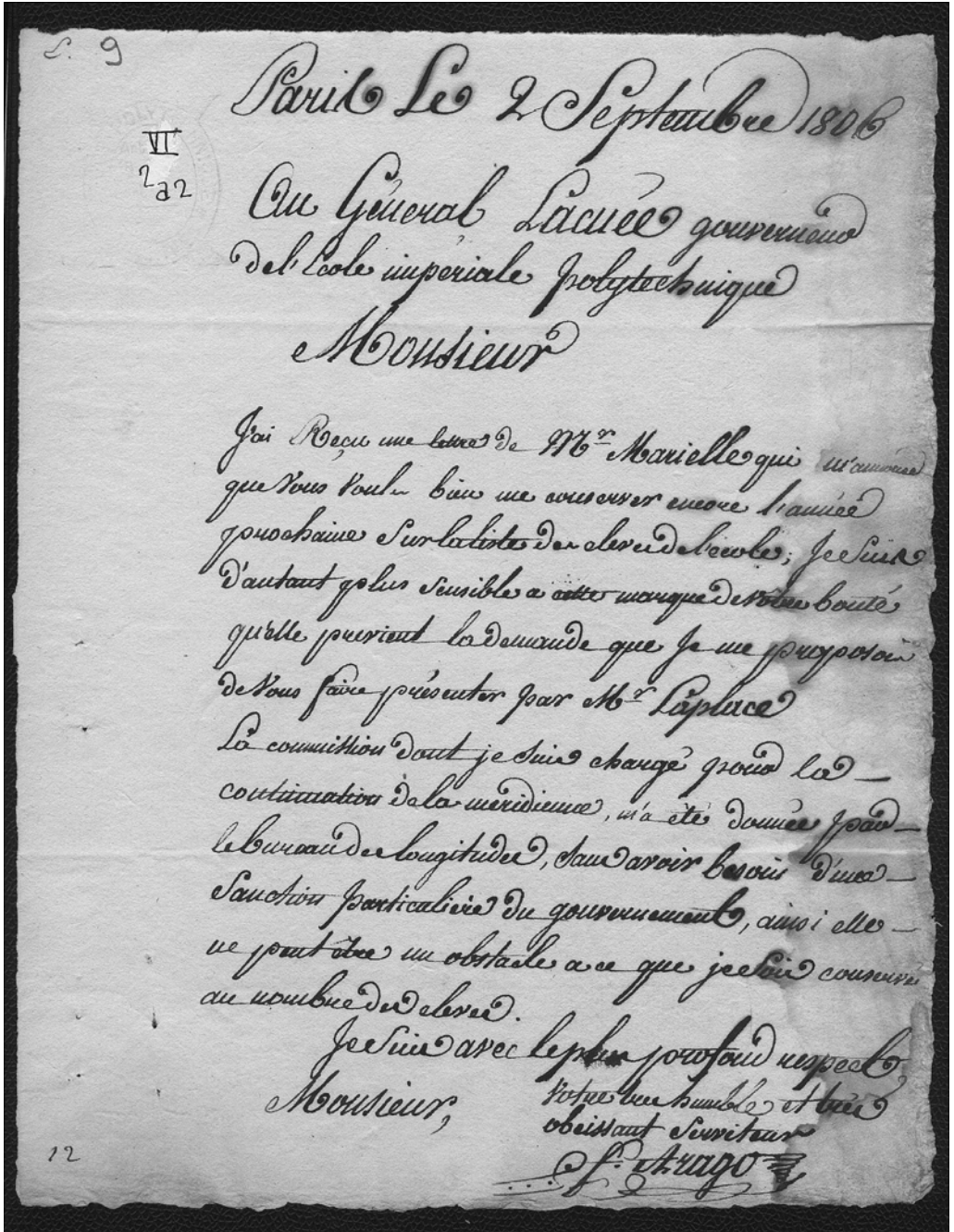


Figure 2.3. Lettre autographe d'Arago au Général Lacuée, gouverneur de l'École polytechnique, lui demandant de maintenir son inscription en tant qu'élève pendant son expédition en Espagne.



Figure 2.4. Jean-Baptiste Biot
(1774-1862).

est accueilli avec enthousiasme, les fonds nécessaires sont obtenus par Laplace auprès de l'Empereur, et voici nos deux savants partis pour la Catalogne le 3 septembre 1806, accompagnés par le commissaire espagnol José Rodriguez, qui était étudiant à Paris, et un dénommé Chaix. Cela commence mal : la mauvaise orientation d'un réverbère (miroir parabolique au foyer duquel on allume une lampe à huile), qui doit permettre la visée nocturne du sommet d'une montagne sur l'île d'Ibiza depuis le continent, fait qu'on ne le voit que très difficilement. Arago doit rester six mois au Desierto de las Palmas avant de pouvoir réussir les observations. Il faut dire que la distance entre ce point et Ibiza est d'environ 170 kilomètres ! Les mesures suivantes, moins difficiles, se passent plutôt bien malgré les vicissitudes politiques et divers ennuis avec les populations locales.

Biot doit rentrer en France en mai 1807 et ne revient que pour peu de temps en Espagne à la fin de l'année : il laisse ainsi le jeune Arago terminer seul avec ses deux acolytes Chaix et Rodriguez les mesures jusqu'à Formentera puis Majorque. En août, Arago est nommé en son absence astronome adjoint par le Bureau des longitudes en remplacement de Michel Lefrançois, le neveu de Lalande, promu titulaire. Le rapport fait au Ministre à cette occasion précise :

« Les connaissances astronomiques qui distinguent déjà M. Arago, et les services qu'il rend en ce moment dans l'opération importante confiée à ses soins, sont les motifs du choix du Bureau des longitudes. »

Au printemps de 1808, l'entrée des troupes françaises en Espagne rend la situation d'Arago des plus inconfortables. Il s'ensuit une odyssée racontée avec beaucoup d'humour dans *l'Histoire de ma jeunesse*, et de façon moins détaillée dans le *Discours sur l'Algérie* prononcé le 19 avril 1833 devant la Chambre⁷. Comme cet épisode est bien connu, nous n'en donnerons qu'un très bref résumé.

Emprisonné par les Espagnols, Arago, aidé par sa connaissance du catalan qui est sa langue maternelle, s'évade et atteint Alger. Il s'y embarque pour Marseille sur un navire qui se trouve transporter deux lions et des singes offerts par le dey d'Alger à Napoléon I^{er} (figure 2.5). Mais le navire est intercepté par un corsaire espagnol qui l'emmène en Catalogne. Prévenu discrètement par Arago de cette aventure et de la mort d'un des lions, le dey se

Arago et son lion à bord des *Trois-Frères*

Figure 2.5. Arago rendant visite à un des lions du Dey d'Alger sur son navire (gravure de la fin du XIX^e siècle).

met en colère et fait relâcher le navire, qui reprend sa route vers Marseille après trois mois d'inactivité. Ce n'est pas la fin du voyage : un violent coup de mistral repousse le bateau vers les côtes d'Afrique du Nord. Il aborde à Bougie, avec le lion survivant et les singes que les malheureux passagers ont utilisés pour se faire épouiller ! Arago rejoint alors Alger par la terre, ce qui est loin d'être sans danger, avant de s'embarquer à nouveau pour Marseille, qu'il n'atteint que le 2 juillet 1809, près de trois ans après avoir quitté Paris. Tout au long de ce périple, il a conservé avec lui ses instruments et le résultat de ses mesures.

Pendant ce temps, le Bureau des longitudes suit de près l'aventure de son membre adjoint, dans la mesure où celui-ci parvient à communiquer avec son père. Voici les extraits correspondants des procès-verbaux des séances du Bureau :

« 22 septembre 1808 : On a des inquiétudes sur M. Arago. Le Président [du Bureau] est autorisé (par mesure de prudence) à retenir son traitement jusqu'à ce qu'on ait de ses nouvelles.

30 septembre 1808 : On lit une lettre de M. Arago père ; elle donne des nouvelles de son fils qui était tranquille et en bonne santé à Mallorca [sic]. On annule l'arrêté touchant son traitement pris dans la dernière séance.

7 octobre 1808 : On lit une lettre d'Arago père. Une insurrection a éclaté à Mallorca. Le capitaine du Mystique [sic : pour mistic, type de bateau local] envoya un billet à Arago (qui était à une station) pour l'avertir que sa vie était en danger et l'inviter à se rendre au Bâtiment. Dans le trajet, la populace lui fit quelques menaces. Il fut conduit sur l'ordre des autorités de l'île au fort.

5 novembre 1808 : On communique une lettre d'Arago père : son fils est tranquille et en bonne santé à Mallorca [sic].

9 novembre 1808 : Lettre d'Arago père. Son fils échappé de Mallorca s'est réfugié à Alger où il a été fort bien reçu par le Consul français. Revenant en France sur un bâtiment algérien il a été pris par un vaisseau espagnol qui l'a conduit à Palamós [non loin de Gérone].

21 décembre 1808 : Lettre du Ministre de l'Intérieur qui donne des nouvelles d'Arago. Il annonce que la junte de Girone [Gérone] est chargée de prononcer sur le sort du navire algérien sur lequel il était et qui a été capturé.

18 janvier 1809 : Lettre d'Arago père qui annonce que son fils est en bonne santé et qu'il est retourné à la côte d'Afrique d'où il reviendra en France.

8 février 1809 : Lettre d'Arago père annonçant que son fils a sauvé tous ses manuscrits et tous ses instruments. »

Puis plus de nouvelles. Enfin :

« 19 juillet 1809 : Lettre d'Arago annonçant que son fils est arrivé à Marseille.

30 août 1809 : M. Arago, de retour d'Afrique, présente les manuscrits de ses dernières observations à Iviza, à Formentera et à Majorque. »

Retenu en quarantaine au lazaret de l'île Pomègue comme le veut la règle, Arago reprend enfin contact avec

sa famille et ses amis. Il y reçoit la visite de Jean-Louis Pons, le concierge de l'Observatoire de Marseille, grand découvreur de comètes qui devait être nommé en 1819 directeur de l'Observatoire de Lucques, puis en 1825 de celui de Florence.

L'amitié de Humboldt

C'est alors qu'il reçoit une lettre d'un savant fort célèbre, Alexander von Humboldt, qui francise généralement son nom en Alexandre de Humboldt^d (encadré 2.1). Enthousiasmé par son aventure, Humboldt félicite le jeune homme et lui offre son amitié. Cette amitié durera quarante-quatre ans. Ils partagent le même idéal scientifique et politique. Pour Humboldt (figure 2.6), Arago est un génie dont il pense (à tort !) qu'il lui est intellectuellement supérieur. Les déclarations contenues dans ses lettres laissent à penser ; par exemple :

« Depuis que je n'ai plus le bonheur de t'entendre et de te fatiguer de mes questions, il ne se passe pas une heure de ma vie que je ne sois occupé de toi, comme de la personne que j'admire le plus dans ce monde⁸. »

Ou bien, reprochant comme souvent à Arago de ne pas lui écrire :

« Je ne te demande que trois ou quatre lignes comme j'ai eu le bonheur d'en avoir autrefois pendant vingt ans, de ta main. Après quinze mois de silence absolu, la prière de l'ami qui t'a toujours été dévoué autant et peut-être plus qu'aucun membre de ta famille, ne peut te paraître importune⁹. »

Effectivement Arago écrit peu souvent à Humboldt, se méfiant sans doute de ses sentiments extrêmes. Ses termes sont chaleureux mais sans excès. Il lui écrit par exemple en 1841, apprenant sa prochaine visite à Paris :

« En dehors de ma famille, tu es, sans aucune comparaison, la personne du monde que j'aime le plus tendrement. Il faut aussi te résigner : tu es le seul de mes amis sur lequel je compterais dans des circonstances difficiles. Je suis vraiment heureux de la pensée que je passerai quelques soirées avec la personne à qui je dois mon goût pour la météorologie et la physique du globe. Il y aura pour toi un lit à l'Observatoire¹⁰. »

^d Cette lettre a malheureusement disparu.



Figure 2.6. Alexandre de Humboldt (1769-1859).

Encadré 2.1. Alexandre de Humboldt¹¹

Humboldt est né en 1769 dans une famille prussienne aristocratique fortunée, au château de Tegel, actuellement englobé dans la ville de Berlin, où il passera la fin de sa longue vie. Tout jeune, il montre un très grand intérêt pour l'histoire naturelle. Un voyage à travers l'Europe le conduit à Paris en 1790, où il se passionne pour la Révolution : il en gardera des idées sociales avancées qui tranchent avec ses origines et souvent avec son environnement. Il entre à l'École des mines de Freiberg et, à la sortie, devient en 1792 Inspecteur général des mines. Il s'occupe activement d'améliorer le sort des mineurs, tout en effectuant diverses missions diplomatiques pour le compte de la Prusse. En 1798, il part avec le botaniste Aimé Bonpland pour un voyage de cinq ans et 5 000 kilomètres en « Amérique équinoxiale » : ils découvrent la jonction Orénoque-Amazone, décrivent le courant froid qui remonte la côte ouest de l'Amérique du sud, gravissent le Chimborazo et accumulent une masse inégalée d'observations. En 1808, Humboldt s'installe à Paris où il séjourne jusqu'en 1827, prenant une part active à la vie scientifique française et travaillant souvent avec son grand ami Arago. Il y rédige en français son *Voyage aux régions équinoxiales du nouveau continent*, en trente volumes ! Rappelé en Prusse par le roi, qui lui confie diverses missions et en fait son ami malgré ses opinions de gauche, il y donne de très nombreuses conférences à l'instar d'Arago. Il fait en 1829 un nouveau voyage de 19 000 kilomètres en Russie et en Sibérie, puis d'autres voyages moins importants, dont un à Paris en 1841. La fin de sa vie est occupée par la rédaction de son grand ouvrage de synthèse en allemand, *Kosmos*¹², par des visites incessantes et par son énorme correspondance : il reçoit en moyenne 3 000 lettres par an et répond à 2 000 d'entre elles (figure 2.7) ! Il meurt en 1859, âgé de 90 ans.

Humboldt est le dernier savant encyclopédiste, dont la culture et l'activité sont stupéfiantes. Son influence est immense sur ses contemporains et sur Arago en particulier. C'est un des plus grands explorateurs de tous les temps ; ses travaux en géophysique et en océanographie sont particulièrement remarquables.

Quoi qu'il en soit, les deux hommes sont intimes et se voient pratiquement tous les jours quand ils se trouvent ensemble à Paris. Nous verrons qu'ils ont fait en commun des recherches assez variées à l'Observatoire, et le passage qui vient d'être cité montre ce qu'Arago doit à Humboldt sur le plan scientifique.

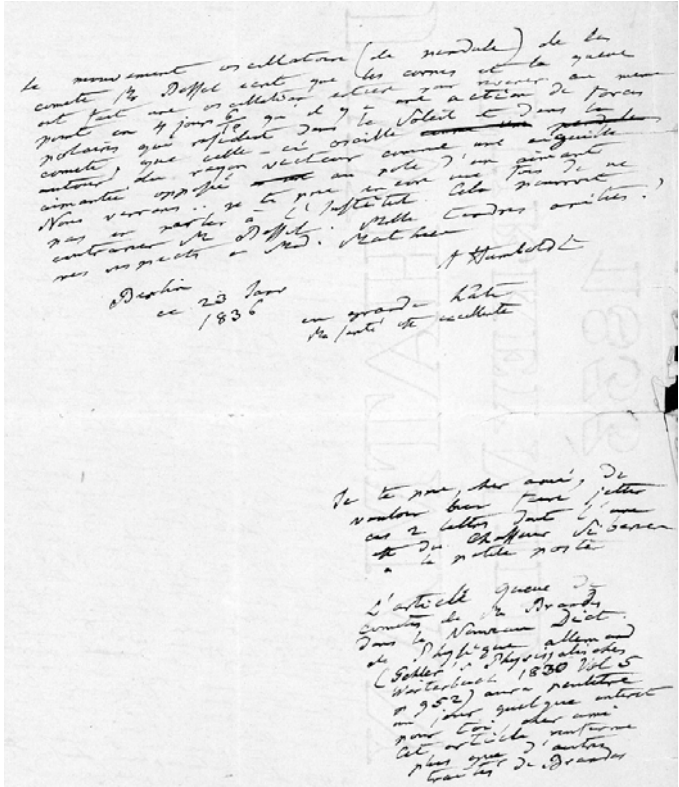


Figure 2.7. La dernière page d'une lettre autographe de Humboldt à Arago, à propos d'une comète. Humboldt était partiellement paralysé du bras droit, d'où son écriture très inclinée.

La grande période d'activité scientifique (1809-1830)

L'élection à l'Institut

Peu de jours après son arrivée à Paris, le 18 septembre 1809, Arago est élu à la Première classe de l'Institut (nom provisoire de l'Académie des sciences). Il a vingt-trois ans, et est le plus jeune savant jamais élu dans cette assemblée. Il est évident que ses tribulations sont pour beaucoup dans son élection, mais il a déjà fait ses preuves en tant que

scientifique : il a réussi à ramener à Paris ses observations qui se sont révélées excellentes, et l'œuvre qu'il a accomplie en vingt mois avant son départ est impressionnante par sa qualité et par son originalité. Cependant l'élection ne se fait pas sans difficulté : Laplace appuie fortement la candidature de Poisson, plus âgé qu'Arago et déjà professeur de géométrie, tandis qu'Arago est défendu par Delambre, Lagrange, Legendre et Biot. Il est amusant de rapporter les vifs échanges qui ont lieu à ce moment, du moins tels qu'Arago se les rappelle à la fin de sa vie en dictant son *Histoire de ma jeunesse* :

« M. de Laplace, sans nier l'importance et l'utilité de [mes] travaux et de [mes] recherches, n'y voyait qu'une espérance ; alors, M. Lagrange lui dit en termes formels :

« Vous-même, monsieur de Laplace, quand vous entrâtes à l'Académie, vous n'aviez rien fait de saillant ; vous donniez seulement des espérances. Vos grandes découvertes ne sont venues qu'après. »^e

Lagrange était le seul homme en Europe qui pût avec autorité lui adresser une pareille observation.

M. de Laplace ne répliqua pas sur le fait personnel ; mais il ajouta : « Je maintiens qu'il est utile de montrer aux jeunes savants une place de membre de l'Institut comme une récompense pour exciter leur zèle. »

« Vous ressemblez, répliqua M. Hallé, à ce cocher de fiacre qui, pour exciter ses chevaux à la course, attachait une botte de foin au bout du timon de sa voiture. Les pauvres chevaux redoublaient d'efforts, et la botte de foin fuyait toujours devant eux. En fin de compte, cette pratique amena leur dépérissement, et bientôt après leur mort. »

Les manœuvres de Laplace n'ayant pas réussi, Arago est élu par 47 voix contre 4 pour Poisson et une pour Nicolas-Antoine Nouet, un astronome qui avait participé avec Méchain à l'expédition d'Égypte. Dès le 4 octobre, Napoléon approuve la nomination de son ancien ennemi ; mais il n'a guère le choix.

Arago raconte à la fin de l'*Histoire de ma jeunesse* plusieurs anecdotes concernant des élections à l'Académie des sciences, où il tend à se donner le beau rôle même si ce

^e Laplace est entré à l'Académie en 1773 comme « adjoint mécanicien », à l'âge de 24 ans, puis est devenu membre de l'Institut de France à sa création en 1795.

n'est pas toujours justifié. Au dire des contemporains, et notamment de Laplace qui le surnomme *le grand Électeur*, il y joue un rôle prépondérant. En 1822, après le décès de Delambre, il faut élire un nouveau Secrétaire perpétuel. Biot et Joseph Fourier sont candidats, et d'après ses dires Arago a été poussé par ses collègues à se présenter lui aussi. Se trouvant sans doute trop jeune pour ce poste, le plus important de l'Académie, il déclare qu'il cumule déjà « *autant d'emplois qu'il en [peut] remplir,* » ajoutant « *qu'à cet égard M. Biot [est] dans la même position* ». Il cisaille ainsi la candidature de Biot, et ceci n'améliorera pas les rapports déjà assez tendus entre les deux hommes. Fourier est donc élu, et après son décès en 1830, c'est Arago qui deviendra secrétaire perpétuel, Biot étant définitivement éliminé.

La nomination d'Arago à l'Institut lui ouvre toutes les portes. Il fréquente de brillants salons et y rencontre Lucie Carrier-Desombes, qu'il épouse le 11 septembre 1811. Familier de Laplace, il entre à la Société d'Arcueil, dont Humboldt fait déjà partie ; il s'y lie avec Gay-Lussac (figure 2.8), et avec un autre ancien de l'expédition d'Égypte, Étienne-Louis Malus, dont il pousse avec succès en 1810 l'élection à l'Institut contre un ingénieur, Pierre-Simon Girard. Il y refait aussi connaissance avec Gaspard Monge, le fondateur de l'École polytechnique : c'est le début de sa carrière d'enseignant.

Enseignant à l'École polytechnique

Professeur d'*Analyse appliquée à la géométrie* à l'École polytechnique, Monge, âgé de 64 ans et de santé déclinante, cherche un suppléant. Il a d'abord pensé à son répétiteur, Jacques Binet ; mais l'Empereur, à qui Monge en parle, a entre les mains un rapport de police qui dénonce Binet comme « *disciple de Loyola* » (jésuite) ! Il faut donc trouver quelqu'un d'autre : c'est Arago. Celui-ci donne son premier cours le 26 octobre 1810 « *avec la plus grande clarté* ». En mai 1812, il est nommé professeur adjoint à la demande de Monge, qui l'a visiblement en haute estime. En plus de l'analyse appliquée à la géométrie, Arago doit enseigner la géodésie, qu'il connaît évidemment très bien. Nommé professeur en 1816, il y ajoute en 1818 un cours d'*arithmétique sociale*, une discipline nouvelle qui applique le calcul des probabilités développé par Laplace



Figure 2.8. Joseph Gay-Lussac (1778-1850).

à la démographie et à l'économie. L'époque est en effet aux statistiques en tout genre utilisant ce nouvel outil qui suscite l'enthousiasme ; l'enseignement d'Arago reste assez élémentaire, mais il acquiert ainsi des connaissances en économie qui lui seront très utiles plus tard dans ses interventions à la Chambre.

Arago donne aussi un *cours de machines*¹³. Hachette avait enseigné ce cours jusqu'à sa mise à l'écart à la Restauration ; après une période de flottement, il est confié en 1819 à Alexis Petit, qui tombe malade cette même année pour décéder en 1820. Arago le remplace pour les quinze leçons de l'année scolaire 1819-1820, mais, surchargé de travail, il demande lui-même à être remplacé. Ampère, qui est professeur de mécanique rationnelle, est alors nommé, mais il tombe lui aussi malade au bout de quelques leçons, si bien qu'Arago reprend du service en novembre 1821, cette fois jusqu'en 1830. Le cours, composé de deux douzaines de leçons par an, comprend la description et le fonctionnement de diverses machines et éléments de machines, accompagnés d'épures de géométrie descriptive concernant une presse hydraulique, un moulin à farine, une machine à vapeur de Watt et une « *machine à feu employée au mouvement d'un bateau* ». Il s'agit simplement pour les élèves de reproduire ces épures, ce qui a pour but de leur donner des éléments de dessin industriel ; on en a conservé de beaux témoignages (voir plus loin la figure 11.4). Mais certains d'entre eux veulent comprendre l'histoire et le fonctionnement de ces machines : c'est, dit-il, à la demande de ses élèves de 1823 qu'Arago écrit sa remarquable *Notice historique sur les machines à vapeur*¹⁴.

Après la Révolution de 1830, Arago, très occupé par ses activités de député et de Secrétaire perpétuel et peu désireux de cumuler les fonctions, donne sa démission de professeur. Félix Savary, qui était son répétiteur depuis deux ans, lui succède dans ses différents cours jusqu'à son décès en 1841. Fort malade pendant sa dernière année de vie, Savary est remplacé par Urbain J.J. Le Verrier, qui était son propre répétiteur. Ce dernier n'est cependant pas nommé au poste libéré par Savary, et en est certainement fort amer. Arago est-il intervenu ? C'est peu probable, mais ceci n'améliorera pas les relations entre les deux hommes, qui deviendront progressivement exécrables.

À cette époque, les rôles se répartissent entre l'École polytechnique, où sont données les bases générales, et les

écoles d'application où sont abordés les problèmes plus concrets selon leur spécialité. De son côté, l'École centrale des arts et manufactures, créée en 1829, donne de nombreux cours spécialisés qui répondent à des besoins nouveaux en cette période d'essor rapide du machinisme. Signe des temps, des enseignements de mécanique appliquée voient également le jour en 1838-1839 à la Sorbonne et au Conservatoire des arts et métiers.

Malgré sa démission, Arago, qui est provisoirement en faveur auprès de Louis-Philippe que les Trois Glorieuses avaient porté au pouvoir, est chargé d'une réorganisation de l'École polytechnique. Il prône de conserver le rattachement de l'École au Ministère de la guerre et l'encaissement des élèves, ce qui fait l'objet de critiques vives et durables : le débat sur le statut de l'École se poursuit à la Chambre dans les années 1833-1836. Arago exerce aussi son influence sur le Conseil de perfectionnement de l'École dont il est membre de 1832 à 1844 ; jusqu'à son dernier souffle, il s'intéressera à l'École polytechnique. Celle-ci le lui rendra bien : le nom d'Arago a été donné à un de ses grands amphithéâtres.

Les travaux scientifiques

L'activité scientifique d'Arago est aussi abondante que variée. Nous aurons l'occasion d'en détailler les différents aspects dans les chapitres qui suivent, et nous ne ferons ici que les replacer dans le temps. Trois remarques générales s'imposent : Arago est avant tout un expérimentateur et un observateur, qui laisse à d'autres le soin de faire la théorie de ce qu'il voit ; il a des idées originales, surtout au début de sa carrière, mais il sait aussi travailler avec d'autres qui en ont plus que lui, en reconnaissant honnêtement leur contribution ; enfin, il s'enthousiasme pour les nouveaux domaines de la science et s'y précipite, quitte à laisser tomber des recherches en cours.

En 1810, Arago est déjà un savant établi. Il aurait pu s'endormir sur ses lauriers, mais ce n'est pas son genre. Aussi, une fois calmée l'excitation qu'a dû provoquer sa brillante élection à l'Institut, reprend-il les travaux qu'il avait abandonnés pour partir en Espagne. D'abord l'astronomie : outre les observations de routine, il tente à nouveau de déterminer si la lumière provenant de différents astres est déviée de la même façon par un prisme, pensant ainsi mesurer des variations éventuelles de la vitesse de la

lumière. Il s'intéresse aussi à la polarisation de la lumière, phénomène nouveau découvert par son ami Malus. C'est à la fin de l'année 1810 qu'Arago fait une découverte importante : celle de la polarisation rotatoire chromatique. Il ne tarde pas à construire un *polarimètre*, appareil permettant de mesurer la polarisation d'une lumière en utilisant le phénomène qu'il a découvert, et à le braquer sur différentes sources lumineuses, faisant alors une moisson d'observations très intéressantes. Il en déduit notamment la nature gazeuse du Soleil, ce qui marque le début de l'astrophysique : c'est en effet la première fois que l'on peut dire quelque chose sur la nature physique d'un astre lointain.

Mais déjà Arago est parti dans d'autres voies, laissant à Biot le soin de développer les applications pratiques de la polarisation rotatoire. Il utilisera cependant pendant toute sa vie sa connaissance profonde de la polarisation pour concevoir des instruments à vocation astronomique et géophysique.

Pour l'instant, il s'occupe de la réfraction et de la dispersion de la lumière dans différents gaz : un travail moins exaltant que celui sur la polarisation mais utile, qui devait s'étendre sur plusieurs années. Et puis, il lui faut faire son enseignement à Polytechnique, et surtout préparer le cours public d'astronomie prévu par les statuts du Bureau des longitudes, dont il a été chargé. La première leçon a lieu le 3 février 1813. Le succès est rapide et Arago donnera ce cours jusqu'en 1846.

En 1815, Arago est désormais célèbre. En témoigne l'anecdote suivante qu'il rapporte dans sa biographie de Monge¹⁵. La scène se passe après la seconde abdication de Napoléon I^{er} :

« Le vaincu de Waterloo habitait l'Élysée. Dans un de ses entretiens intimes avec Monge, Napoléon développa les projets qu'il avait en vue. L'Amérique était son point de mire ; il croyait pouvoir s'y rendre sans difficulté, sans obstacle, et y vivre librement.[...] « Condamné à ne plus commander des armées, je ne vois que les sciences qui puissent s'emparer fortement de mon âme et de mon esprit. Apprendre ce que les autres ont fait ne saurait me suffire. Je veux, dans cette nouvelle carrière, laisser des travaux, des découvertes dignes de moi. Il me faut un compagnon qui me mette d'abord et rapidement au courant de l'état actuel des sciences. Ensuite, nous parcourrons ensemble le nouveau continent, depuis le Canada jusqu'au cap Horn, et dans cet immense voyage

nous étudierons tous les grands phénomènes de la physique du globe, sur lesquels le monde savant ne s'est pas encore prononcé.^f » Monge, transporté d'enthousiasme, s'écria : « Sire, votre collaborateur est tout trouvé : je vous accompagne ! » Napoléon remercia son ami avec effusion. Il lui fit comprendre, non sans peine, qu'un septuagénaire ne pouvait guère se lancer dans une entreprise aussi périlleuse. « On s'adressa alors à un savant beaucoup plus jeune [c'est évidemment Arago]. Monge exposait à son confrère, sous les plus vives couleurs, tout ce que la proposition avait de glorieux par son objet, et plus encore à cause de la position du personnage illustre au nom duquel elle était faite. Une somme considérable devait dédommager le jeune académicien de la perte de ses places ; une autre forte somme était destinée à l'achat d'une collection complète d'instruments d'astronomie, de physique, de météorologie. La négociation n'eut point de résultat. »

En effet, Arago déteste Napoléon ; mais il n'a sans doute pas non plus envie de s'embarquer dans une aventure aussi incertaine.

La même année 1815 voit la rencontre avec Fresnel : un véritable « coup de foudre » scientifique qui conduit Arago non seulement à défendre Fresnel qui échafaude la théorie ondulatoire de la lumière, mais aussi à faire avec lui des expériences dont certaines sont d'un très grand intérêt. Leur collaboration s'étend en 1819 aux phares pour la navigation. Quant à la connaissance qu'a Arago des interférences de la lumière, elle lui permet dès 1814 d'expliquer pour la première fois la scintillation des étoiles, comme elle lui permettra plus tard de réaliser un dispositif permettant de mesurer avec précision l'indice de réfraction des gaz.

En 1820, Arago est témoin à Genève de l'expérience d'Ørsted, qui montre la déviation d'une aiguille aimantée sous l'effet du courant électrique. Il la reproduit aussitôt devant l'Académie des sciences, ce qui suscite un intérêt considérable. Ce qui s'était produit avec Fresnel recommence avec Ampère : tandis que celui-ci, partant de l'expérience d'Ørsted, obtient en quelques mois les premières lois de l'électromagnétisme, Arago collabore avec lui et découvre que le courant électrique a la propriété d'aimanter le fer. Ampère et lui construisent le premier

^f On constate ici l'impact du voyage de Humboldt et Bonpland en Amérique du Sud.

électroaimant. Puis Arago découvre en 1825 le « magnétisme de rotation », qui est l'entraînement d'une aiguille aimantée par un disque de cuivre tournant sur lui-même. Cette observation fait grand bruit et vaut en 1827 à Arago la prestigieuse médaille Copley de la Société royale de Londres. Mais Arago ne peut pas en donner l'explication, ni aucun de ses contemporains, jusqu'à ce que Michael Faraday la comprenne enfin en 1831, après sa découverte de l'induction électromagnétique à laquelle l'expérience avait d'ailleurs contribué.

La découverte du magnétisme de rotation clôt la période la plus féconde de l'activité scientifique d'Arago. Très occupé par ses fonctions au Bureau des longitudes, à l'Observatoire de Paris et à l'Académie des sciences, puis par son activité politique, il ne fera plus que des incursions sporadiques dans l'expérimentation scientifique. Les plus intéressantes sont sa mesure avec Dulong de la « force élastique de la vapeur d'eau » (pression de vapeur saturante en fonction de la température) entre 1825 et 1829, et ses essais infructueux de 1843 pour comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau par une méthode originale, essais repris en 1850 par Foucault et Fizeau, cette fois avec succès.

Arago à l'Observatoire

Les travaux que nous venons de mentionner ne doivent pas nous faire oublier qu'Arago est avant tout astronome : c'est par ce terme qu'il est presque toujours désigné par ses contemporains. Il réside à l'Observatoire (figure 2.9) et participe aux observations, tandis qu'il est chargé par le Bureau des longitudes de différentes missions qui sont alors du ressort des astronomes, par exemple un nouveau rattachement géodésique de la France et de l'Angleterre en 1821 et une nouvelle mesure de la vitesse du son en 1822. Arago était déjà allé en Angleterre avec Gay-Lussac en 1816 (il y avait rencontré Thomas Young), puis en 1817 avec Humboldt et Biot. En 1818, il s'était rendu à Dunkerque avec Biot et l'anglais William Mudge pour en mesurer la latitude. Son dernier grand voyage, en 1834, aura l'Écosse comme destination¹⁶. Arago a donc eu des relations suivies avec l'Angleterre, dont il comprenait la langue. Il s'est aussi rendu à plusieurs reprises à Genève voir son ami Charles Gaspard De La Rive : au moins en 1812 où il a

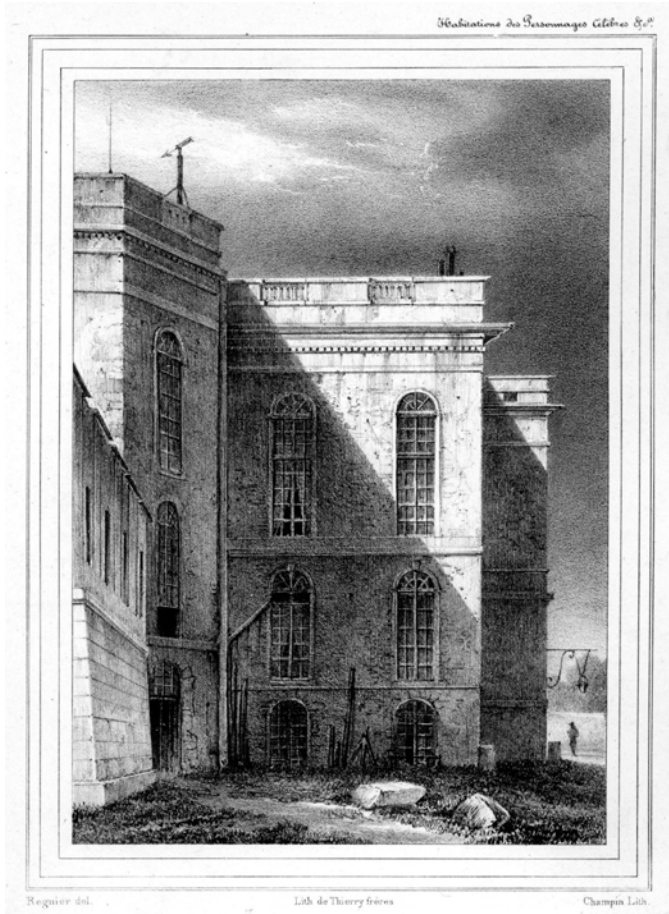


Figure 2.9. Vue de l'Observatoire prise du Nord-Est. Arago habitait dans cette partie du bâtiment.

pu y voir la démonstration de l'arc électrique inventé en Angleterre par Humphry Davy¹⁷, et en 1820 où il a assisté à l'expérience d'Ørsted.

Le Bureau des longitudes tient les rênes de l'Observatoire d'une façon ferme mais quelque peu désordonnée. Arago y occupe certainement une place importante en raison de son aura et de son autorité scientifique, qui est justifiée par son activité efficace, quoique foisonnante. Il est cependant difficile de dire quel poids il a pendant les années 1809-1830 sur l'équipement et le fonctionnement de l'Observatoire. Cependant, on peut penser que son influence augmente progressivement à mesure que celle de Laplace décline et que le plus éminent des astronomes de l'Observatoire, Alexis Bouvard (figure 2.10), se cantonne à des observations de routine,



Figure 2.10. Alexis Bouvard
(1767-1843).

à d'interminables calculs et à des tâches administratives. À la mort de Laplace en 1827, Arago est devenu l'astronome le plus influent de France.

C'est à partir de 1820 que commence à se constituer le « clan Arago », qui devait dominer l'astronomie française jusqu'en 1853 : sa sœur Marguerite se marie en 1821 avec l'astronome Claude Louis Mathieu, tandis que la sœur de Lucie Carrier-Besombes, la femme d'Arago, épouse le physicien Alexis Petit.

La vie d'Arago n'offre pas d'événement bien marquant dans les années 1820, à l'exception du décès prématuré en 1829 de son épouse Lucie. C'était une femme très aimable et très belle, mais relativement effacée, ce qui peut se comprendre au vu de la personnalité de son mari. Après la mort de Lucie, leurs trois enfants, dont l'aîné a 17 ans, sont confiés à leur tante Marguerite et les liens familiaux se resserrent autour de François. Il ne se remariera pas, et on ne lui connaît pas avec certitude d'aventure sentimentale. L'Observatoire continue d'être un lieu de rencontre, avec des réceptions le lundi, mais on peut imaginer qu'elles sont moins brillantes qu'auparavant. Humboldt est reparti en Allemagne en 1826, et les amis les plus chers sont morts : Berthollet en 1822 et Fresnel en 1827, juste après qu'Arago lui ait remis la médaille Rumford de la Société royale de Londres. Quant à Gay-Lussac, avec lequel il avait été très lié, il recherche maintenant les honneurs et l'argent, ce qui ne peut plaire à Arago. Arago se réfugie dans le travail, acceptant malgré son lourd enseignement et ses tâches d'observation d'écrire de nombreux articles et comptes rendus dans son journal, les *Annales de chimie et de physique*, et ses célèbres Notices scientifiques dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes*. On ne peut non plus oublier les rapports que lui confie très fréquemment l'Académie des sciences. Il en est maintenant un des membres les plus influents, ce que confirme son élection le 7 juin 1830 au poste le plus prestigieux de l'Académie : celui de secrétaire perpétuel pour les Sciences mathématiques.

L'homme politique (1830-1838)

Bien qu'Arago ait manifesté à plusieurs reprises son opposition à Napoléon I^{er} et se soit ouvertement rallié

à la monarchie constitutionnelle à la Restauration, son entrée dans la vie politique est tardive. Le 25 juillet 1830, après un bras de fer avec la Chambre, Charles X signe les ordonnances qui violent la Charte de 1814 en restreignant la liberté de la presse, en dissolvant la Chambre qui vient d'être élue et en réduisant le corps électoral des prochaines législatives. Or, le lendemain, Arago arrive à l'Académie où il doit inaugurer ses nouvelles fonctions de secrétaire perpétuel en prononçant l'éloge funèbre de Fresnel. Il y découvre les ordonnances, manifeste son émotion à ses collègues et déclare qu'il ne prendra pas la parole en ces circonstances. Cette menace provoque une vive réaction de Cuvier, l'autre secrétaire perpétuel, qui craint la suppression de l'Académie. Finalement on transige. Arago présente sa « notice biographique » de Fresnel¹⁸, mais y insère malgré Cuvier des allusions très remarquées à la restriction des libertés et aux atteintes de la Charte, par exemple :

« Fresnel, comme tant de bons esprits, s'associa vivement en 1814 aux espérances que le retour de la famille des Bourbons faisait naître. La Charte de 1814, exécutée sans arrière-pensée, lui paraissait renfermer tous les germes d'une sage liberté. Il y voyait l'aurore d'une régénération politique qui devait, sans secousses, s'étendre de la France à toute l'Europe. »

Ces mots déclenchent des « applaudissements frénétiques », dont ceux d'Étienne, le frère de François, et d'Alexandre Dumas. Ce dernier écrit avec enthousiasme¹⁹ :

« Ce ne fut pas un simple succès qu'obtint Arago. Ce fut un triomphe. Il est impossible d'être plus pittoresque, plus franc, plus beau même que ne l'est François Arago quand une véritable passion l'emporte. [...] Il n'est pas seulement la science, mais encore la conscience ; non seulement le génie, mais encore la probité : je veux être de ceux qui le disent. »

Le lendemain éclate l'insurrection des Trois Glorieuses, dont Étienne est un des meneurs.

Le parlementaire

En trois jours (27, 28 et 29 juillet 1830), la France passe du despotique Charles X, le dernier Bourbon, à Louis-Philippe, non sans avoir frôlé l'instauration de la

république. Ne partageant pas les vues révolutionnaires de son frère Étienne, François essaie de calmer les esprits et finit par se rallier sans complexes au nouveau monarque. Il est officier de la garde nationale, et promu colonel, mais les nouveaux ministres ne ratifient pas cette promotion, ce dont il se plaindra plus tard au roi. C'est en tant que commandant de la 12^e légion de la garde nationale qu'il se trouve mêlé le 14 février 1831 à un événement violent : une cérémonie religieuse organisée par des légitimistes à l'église Saint-Germain-l'Auxerrois pour commémorer l'assassinat du duc de Berry, le fils de Charles X, est troublée par des émeutiers qui commencent à saccager l'église, puis s'en prennent à Notre-Dame et à l'Archevêché. Chargé de rétablir l'ordre, Arago tente d'éviter les violences, appelle des renforts qui viennent pas, s'énerve et veut ordonner une charge. Mais Adolphe Thiers, sous-secrétaire d'État, s'interpose et finalement tout rentre dans le calme. François sait-il que son frère Étienne était parmi les émeutiers ? Le résultat de cette agitation est que le gouvernement se raidit et dérive de plus en plus à droite.

C'est alors qu'Arago commence à se convertir à l'opposition au régime. On ne connaît pas ses motivations exactes, et il n'est pas évident qu'il ait subi à ce moment l'influence de son frère, beaucoup plus radical. Toujours est-il qu'il se présente le 7 avril 1831 aux élections de la Chambre des députés, à la fois (ce qui était alors possible) dans l'arrondissement de l'Observatoire, le 12^e à cette époque, et dans son département natal : les Pyrénées-Orientales. Il est élu dans les deux le 6 juillet, et il opte pour le second. Il est vrai qu'à Paris, il a déjà été élu en 1830 conseiller général de la Seine, c'est-à-dire aussi conseiller municipal de Paris, si bien que son influence peut s'étendre aux deux lieux. Il sera constamment réélu pendant vingt ans à la députation, et aussi, avec des interruptions, au Conseil général de la Seine jusqu'à sa démission en 1850.

Les interventions d'Arago au Conseil général et celles qu'il a faites à la Chambre concernant Paris — fortifications, navigation sur la Seine, alimentation de Paris en eau — montrent sa grande connaissance des problèmes parisiens. On connaît son action persuasive et tenace pour le forage de puits artésiens dans la capitale. Et quelle activité à la Chambre des députés ! Au moins 66 discours dont certains très longs, sans parler de

rapports et d'interventions variées. Arago, qui est un grand orateur, se signale par son intérêt pour l'éducation à tous les niveaux et pour les progrès techniques, et au moins autant par ses préoccupations sociales. Il intervient aussi pour essayer de discipliner l'utilisation des fonds publics en dénonçant le gaspillage. Mais laissons ces discours pour en revenir à la politique.

En 1832, bien que toujours royaliste, Arago est clairement dans l'opposition. Celle-ci l'envoie le 6 juin en délégation auprès du roi avec Odilon Barrot et le banquier Jacques Laffitte, qui a été premier ministre en novembre 1830 mais fut vite écarté par Louis-Philippe. La délégation demande au roi « *une marche plus libérale à l'intérieur, et moins marquée de faiblesse et de condescendance à l'étranger* ». Arago désire « *une politique du juste milieu entre le système du 13 mars [1831, date à laquelle le conservateur Casimir Perier a été nommé premier ministre en remplacement de Laffitte] et la république proprement dite, dont aujourd'hui la France ne veut pas* ». Le roi ne veut rien entendre, mais l'échec de la délégation renforce la détermination d'Arago. Sa position de procureur du pouvoir lui permet de se présenter sans complexes en août dans sa circonscription des Pyrénées-Orientales, très marquée à gauche et où les républicains sont nombreux. Il s'y rend et y rencontre un très vif succès, d'autant plus grand que peu de députés prennent à cette époque la peine de se manifester dans leur circonscription si elle est tant soit peu éloignée de Paris.

Cette même année 1832 est marquée pour Arago par des événements douloureux : la mort de son fils Gabriel et de sa sœur Marie-Rose. C'est aussi cette année-là qu'il ressent les premières atteintes du diabète qui ne fera que s'aggraver par la suite. Mais l'évolution politique l'oblige à dominer ses soucis personnels, qu'il surmonte par son acharnement au travail. Parmi ses nombreux discours, celui du 16 mai 1840 sur la réforme électorale marque un tournant : il y évoque la nécessité d'organiser le travail, y dénonce les souffrances de la classe ouvrière et y affirme que le progrès social sera obtenu par la réforme électorale et le remplacement du suffrage censitaire par le suffrage universel (des hommes, car nul ne pensait alors à donner le droit de vote aux femmes !) Arago est maintenant presque républicain. L'encadré 2.2 reproduit quelques extraits de ce remarquable discours, prémonitoire en certains points.

Encadré 2.2. Extraits du discours d'Arago devant la Chambre des députés, le 16 mai 1840

« Messieurs,

« J'aime mieux être franc dès le début : je déclare donc que je vais soutenir les pétitions les plus larges [...] demandant la réforme de la loi du cens électoral.[...] Je sais que l'opinion à laquelle je me range a très-peu de partisans sur ces bancs, même parmi mes anciens amis politiques.[...]

« Je maintiens, moi, que le principe de la souveraineté politique n'est qu'un vain mot dans tout pays où, sur quarante hommes, on ne compte qu'un électeur.

« Je maintiens que la partie de la population qui est privée de toute espèce de droits politiques est non-seulement la plus nombreuse, mais encore qu'elle paie la part de beaucoup la plus considérable dans les contributions de l'État. (Dénégations, interruption.)[...]

« J'arrive à la grande difficulté. On a dit que les citoyens en faveur desquels nous demandons le droit de suffrage, n'ont pas la capacité suffisante pour l'exercer. De quelle capacité entend-on parler ? Est-ce qu'on doit nous faire subir un examen ?[...] La capacité qu'un électeur doit posséder, c'est celle de distinguer l'honnête homme du fripon, le bon citoyen de l'égoïste, l'homme désintéressé de l'ambitieux.[...]

« On a prétendu que le peuple, si on l'appelait à composer la Chambre, nommerait toujours des hommes illettrés.[...] Eh bien, l'histoire dément cette prévision, elle montre que le peuple n'est pas exclusif, elle montre que le peuple sait aller chercher le mérite là où il se trouve.

« Une de nos assemblées a été nommée par la généralité du peuple : c'est la Convention. (Ah ! Ah ! Murmures.)[...] Sous le règne de la Convention, il s'est passé des choses déplorables.[...] Mais, ne l'oublions pas, la Convention a sauvé le pays, le territoire, notre nationalité. Elle n'a pas laissé, elle, les armées étrangères, les armées ennemies arriver jusqu'à la capitale ; elle a porté nos frontières jusqu'aux limites naturelles de la France ; elle a créé la plupart des belles institutions qui, depuis près d'un demi-siècle, font la gloire de notre patrie.[...]

« Il y a, Messieurs, dans notre pays une partie notable de la population qui souffre beaucoup. Elle souffre à tel

point qu'elle est minée, torturée par la misère et par la faim. (Vive interruption.)[...] Cette partie de la population est plus particulièrement la population manufacturière.

« Eh bien, le mal ira tous les jours en empirant. Les petits capitaux, dans l'industrie, ne pourront pas lutter longtemps encore contre les grands capitaux ; l'industrie qui s'exerce avec des machines l'emportera sur l'industrie qui n'emploie que les forces naturelles de l'homme ; l'industrie qui met en œuvre des machines puissantes, primera toujours celle qui s'exerce avec de petites machines.

« D'ici à peu d'années, la population ouvrière tout entière se trouvera à la merci d'un très petit nombre de capitalistes.

« Messieurs, je viens de faire toucher au doigt un mal réel.[...] Je vais soulever des murmures, si je tire de tous ces faits la conséquence qui en découle logiquement, et si je proclame qu'il y a nécessité d'organiser le travail.[...] Se récrie-t-on sur ce qu'il y a en apparence d'extraordinaire dans une semblable idée, je dirai que vous êtes déjà entrés dans cette voie le jour où l'on vous a saisis d'une loi qui a pour objet de régler le travail des enfants dans les manufactures.[...]

« Il y a des fouriéristes, des saint-simoniens, des babouvistes (exclamations diverses) qui croient avoir trouvé la solution de ce grand problème social.[...] Je voudrais que la Chambre des députés [...] se substituât à des empiriques audacieux qui emporteront le malade avec le mal ; je voudrais que la Chambre des députés inspirât une confiance entière à des classes intéressantes de la société qu'on trompe, qu'on aveugle.[...]

« Si je soutiens la réforme avec persistance, c'est que je suis ami du progrès et du progrès modéré.[...] Ce progrès, le pays l'obtiendra par la réforme électorale.[...]

« Si j'en juge par certains symptômes, le peuple, actuellement persuadé que sa participation au mouvement politique du pays hâterait les améliorations qu'il espère, ne se désistera pas aisément de ses légitimes prétentions. Ce serait, je crois, une immense faute que de lui ôter jusqu'à l'espérance. En présence de la tension extrême des ressorts sociaux, la réforme m'apparaît, à moi, comme une soupape de sûreté.

« La révolution de 1830 a été faite par le peuple. En accueillant les pétitions, fermons la bouche à ceux qui disent qu'elle n'a pas été faite pour le peuple. »

Huit jours après ce discours, dix mille ouvriers viennent à l'Observatoire pour en remercier Arago. Ce sera un de ses souvenirs les plus chers. Son discours aura d'ailleurs un retentissement prolongé : quarante ans plus tard, en 1879, le ministre Paul Bert dit en inaugurant la statue d'Arago à Perpignan :

« Pour la première fois furent entendus en ce siècle, à la tribune de la Chambre, les mots d'organisation du travail et de suffrage universel ; on y parlait avec une sévérité rude et haute, du peuple, de ses besoins et de ses droits. Ce discours était le programme de la République. »

Bien entendu, malgré et en partie en raison de sa notoriété, Arago est violemment attaqué par ses adversaires politiques. Après 1846, c'est le gouvernement lui-même, de plus en plus rigide, qui tente de décrier ses actions et de l'éliminer ; en vain, car il est largement réélu à Perpignan le 2 août après une campagne de terrain. Il est aussi victime de la jalousie. Un article anonyme particulièrement fielleux est publié en mars 1840, donc deux mois avant le grand discours, par la *Revue des Deux-Mondes* ; il s'attaque plus à l'académicien qu'à l'homme politique. Le *National* défend Arago, mais *La Presse*, journal conservateur, essaye de l'enfoncer en dénigrant ses travaux scientifiques : « *Aucun de ses travaux ne lui a demandé plus de temps qu'il n'en faudrait pour en rendre compte.* » Arago n'a pas grand mal à détecter l'auteur de ces diatribes : c'est Guglielmo Libri, un mathématicien proscrit d'Italie pour ses activités politiques (Encadré 2.3). Pourtant Arago l'avait accueilli à Paris, l'aidant en 1833 à acquérir la nationalité française et soutenant son élection à l'Académie des sciences, lui obtenant également des cours au Collège de France et à la Sorbonne pour lui permettre de subsister. Mais malgré des qualités scientifiques certaines, Libri a un caractère détestable et est souvent de mauvaise foi, si bien que les deux hommes s'affrontent violemment à plusieurs reprises à l'Académie, comme en témoignent les *Comptes rendus*²⁰.

Arago a également maille à partir avec quelques astronomes. L'un d'eux, Gustave de Pontécoulant, chercheur médiocre, s'attaque sans ménagement à Arago dans son *Précis d'astronomie* et ailleurs, et va même jusqu'à se demander avec insolence dans une lettre publique « *s'il jouit de toutes ses facultés mentales* » ! Arago, qui ne laisse jamais une attaque sans réponse, écrit une longue lettre ouverte de réfutation publiée dans *Le National*, puis

Encadré 2.3. Guglielmo Libri (1803 ?-1869)²¹

Né en Italie dans une famille qui se disait aristocratique, Libri se distingue très jeune par ses travaux en mathématiques. Pourchassé pour ses activités révolutionnaires, il se réfugie en 1830 en France, où Arago le protège et l'aide. Nommé inspecteur général de l'instruction publique, il est chargé de missions d'inspection des bibliothèques. Il en profite pour les piller abondamment de leurs ouvrages et manuscrits les plus précieux. Il est finalement dénoncé en 1846 et en 1847, et la police dépose sur le bureau de Guizot un rapport secret qui signale ses détournements dont le montant est estimé à 500 000 francs. Ce rapport aurait probablement été enterré si Guizot n'avait pas été destitué par la Révolution de 1848 ; mais il est rendu public, et Libri s'enfuit en Angleterre avec 30 000 volumes, dont seulement 6 caisses seront saisies par la douane. Il les vendra à loisir à de riches Anglais. En France, il est condamné par contumace en 1850 à dix ans de prison, bien que des notables comme Mérimée aient pris sa défense. Il meurt en Angleterre en 1869. De temps à autre, un livre ou un manuscrit volé par cet escroc exceptionnel réapparaît dans une vente et peut être restitué à sa bibliothèque d'origine.

dans un opuscule séparé²². Plus grave est l'attitude de Le Verrier qui tente de prendre la place d'Arago à l'Observatoire et est près d'y parvenir grâce à ses relations avec François Guizot (nous en reparlerons au chapitre 7) : mais la Révolution de 1848 fera échouer son complot, et sa vengeance devra attendre la mort d'Arago.

Heureusement, Arago a plus d'amis que d'ennemis. Ce sont des savants comme Humboldt, Malus, Fresnel, Gay-Lussac ou Ampère, pour ne parler que de ceux de sa génération ou un peu plus âgés, des artistes comme le sculpteur Pierre-Jean David d'Angers qui séjournera à Estagel, des écrivains comme Stendhal, Victor Hugo, François-René de Chateaubriand ou Jules Michelet, et aussi les proches des grands disparus qu'étaient Lavoisier, Condorcet²³ et Laplace.

²³ Arago et la fille de Condorcet publieront ensemble les œuvres de ce dernier.

Toujours généreux, Arago a à cœur de soutenir et de faire connaître ceux dont il reconnaît la valeur (même le détestable Le Verrier !) sans que ni la jalousie, ni la condescendance ne s'en mêlent. Il fréquente aussi sans complexe les grands de ce monde et n'est pas insensible à leurs louanges, mais sans se départir de son esprit critique ni de son franc-parler. Les banquiers ne sont pas exclus de ses relations, comme on peut le voir dans ses discours à la Chambre des députés à propos des chemins de fer ; mais Arago n'est guère intéressé par l'argent et ne laissera aucune fortune.

La révolution de 1848

La révolution de 1848 a été rendue inévitable par le raidissement du gouvernement de Guizot et son opposition à toute réforme, notamment à la réforme électorale²³. Tout rassemblement étant interdit, l'opposition utilise pour se réunir la fiction du banquet (chaque convive paie son repas), qui permet d'obtenir l'autorisation de la police. Dès 1847, environ soixante-dix banquets sont organisés à travers la France, réunissant plus de 22 000 souscripteurs, principalement des bourgeois libéraux. Ceci déplaît fort au roi et à Guizot, qui finissent par interdire le 14 janvier 1848 un banquet qui devait réunir les républicains dans le 12^e arrondissement (alors celui de l'Observatoire). Une partie de l'opposition décide de le maintenir, en le repoussant au 22 février ; l'affrontement commence ce jour-là. Louis-Philippe, conscient de la gravité de la situation, demande à Guizot sa démission pour le remplacer par Louis-Mathieu Molé, son homme de confiance. Molé est impopulaire, mais qu'importe : Paris fête le renvoi de Guizot. Cependant la manifestation dégénère : la troupe tire, il y a des morts, on se bat partout. Le roi trouve prudent d'abdiquer au profit de son petit-fils, la régence étant assurée par sa mère, la duchesse d'Orléans. Elle se présente devant la Chambre des députés, mais celle-ci est envahie par la foule qui réclame la République. La famille royale est exilée ainsi que Guizot. Les orateurs républicains, Emmanuel Arago, Lamartine et Ledru-Rollin, font acclamer les membres d'un gouvernement provisoire (figure 2.11) : Lamartine, Arago, Ledru-Rollin, Adrien Recurt, et Alexandre-Thomas Marie. Les républicains radicaux font ajouter à cette liste les noms de Louis Blanc et de l'« ouvrier » Albert (de son vrai nom Alexandre Martin). On y joindra

également ceux des directeurs des grands journaux républicains, Armand Marrast pour *Le National* et Ferdinand Flocon pour *La Réforme*, un journal auquel Arago avait participé à sa fondation en 1830. Enfin Jacques Charles Dupont de l'Eure, Adolphe Crémieux et Louis-Antoine Garnier-Pagès rejoindront un peu plus tard cette liste, de laquelle Crémieux puis Recurt disparaîtront après quelque temps (ce dernier sera néanmoins Ministre de l'intérieur du 11 mai au 18 juin 1848). La République est proclamée, d'abord par Lamartine le 24 février au balcon de l'Hôtel de Ville (il réussit après des négociations difficiles à obtenir que le drapeau de la République soit tricolore, et non rouge comme le voulaient les radicaux et les socialistes), puis le 27 février, au nom du gouvernement provisoire, par Arago, Crémieux et Dupont de l'Eure au pied de la colonne de la Bastille.

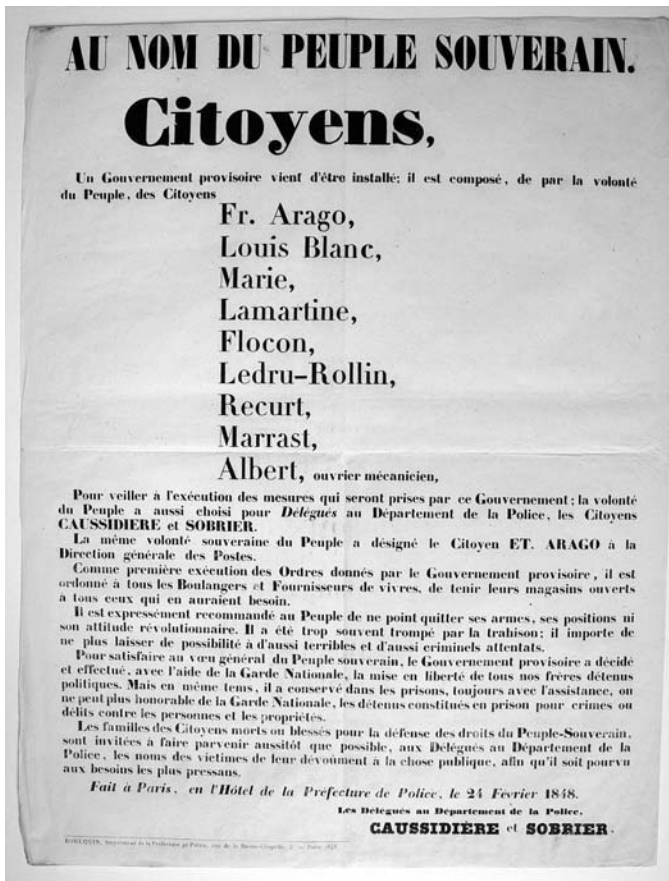


Figure 2.11. Affiche proclamant le gouvernement provisoire le 24 février 1848.

Le gouvernement provisoire nomme des ministres. Ce sont des modérés qui obtiennent les postes, mais ils devront bientôt affronter l'extrême gauche, nourrie par les espérances sociales et les illusions utopiques. À Arago revient le Ministère de la marine et des colonies : c'est, selon Lamartine, « *sa place naturelle [...], avec sa science, son autorité sur les armes savantes, sa renommée aussi vaste que le globe où son nom allait flotter*²⁴ ». On y ajoute bientôt le Ministère de la guerre. De son côté, son frère Étienne Arago s'autoproclame Directeur général (ministre) des postes après en avoir éliminé le directeur en titre ; ceci lui permet d'annoncer partout en France, en un temps record, le succès de la Révolution. Quant à son fils Emmanuel, il se retrouve Commissaire de la République à Lyon, aux prises avec une situation difficile qu'il ne réussit pas à surmonter. Il est rappelé et nommé ambassadeur à Berlin.

François Arago prend très vite des mesures libérales et humanistes dans les domaines où il a le pouvoir : décret du 2 mars pénalisant les chefs d'entreprise qui imposent plus de dix heures de travail par jour à leurs salariés, interdiction le 12 mars des châtiments corporels dans la marine où ils étaient abondamment pratiqués²⁵, décret du 28 mars facilitant la naturalisation des étrangers, etc. Mais surtout, il est celui qui a signé le 27 avril 1848 le décret abolissant l'esclavage dans les colonies (figure 2.12). C'est injustement que l'on attribue souvent au seul Victor Schoelcher le mérite de cet acte de justice qui l'a conduit au Panthéon en 1948. Mais les faits suffisent à honorer également la mémoire d'Arago.

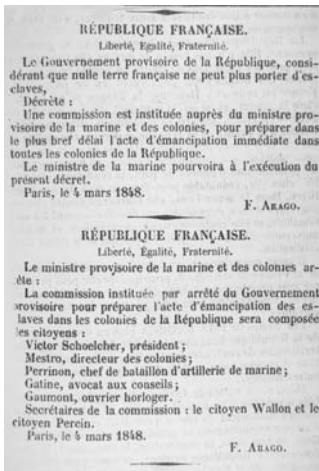


Figure 2.12. Décrets créant une commission chargée de préparer l'abolition de l'esclavage et nommant les membres de cette commission, le 4 mars 1848.

L'abolition de l'esclavage²⁶

L'esclavage avait été une première fois aboli par la Convention en 1794, sous l'impulsion de militants dont le principal était Condorcet. Arago connaît parfaitement l'histoire : en 1841, il lit devant l'Académie des sciences sa biographie de Condorcet, dont l'appendice, qui est une critique des passages relatifs à celui-ci de l'*Histoire des*

Girondins de Lamartine^h, montre qu'il sympathise avec les opinions abolitionnistes de Condorcet, contrairement à Lamartine²⁷ :

« Dans le vol II [de son *Histoire des Girondins*], page 92, M. de Lamartine traite avec une grande sévérité les membres de la Société des amis des noirs, au nombre desquels il place avec raison Condorcet. Il les accuse « d'avoir lancé leurs principes sur les colonies comme d'une vengeance plutôt que comme une justice. Ces principes, ajoute-t-il, avaient éclaté sans préparation et sans prévoyance dans cette société coloniale, où la vérité n'avait d'autre organe que l'insurrection. »

« En écrivant ces lignes, M. de Lamartine savait-il que déjà, en 1776, dans l'Éloge de Pascal, Condorcet s'élevait contre l'esclavage des noirs ; qu'en 1781, il publiait un Mémoire intitulé : *Réflexions sur l'esclavage des nègres* ; qu'en février 1789, il adressait au corps électoral un écrit sur cette plaie de la société ; qu'en juin de la même année, il faisait paraître un écrit remarquable sur l'admission des députés des planteurs de Saint-Domingue ? Les projets d'émancipation détaillés dans ces deux écrits ont cela de remarquable, que plusieurs des dispositions qu'on y trouve figurent dans les lois anglaises rendues postérieurement [la loi de 1807 interdisant le commerce des esclaves, et celle de 1833 abolissant l'esclavage lui-même]. »

Mais, en France, Bonaparte a rétabli l'esclavage en 1802 sous l'influence des colons, relayée par Joséphine, fille de colons de la Martinique. Après quelques tentatives isolées, le combat abolitionniste n'a vraiment repris qu'en 1830 sous l'impulsion de Victor Schœlcher, qui a noué à ce propos des contacts avec Arago, Louis Blanc, David d'Angers, etc.

En février 1848, lorsque Arago est nommé ministre, Schœlcher est au Sénégal. Ledru-Rollin et Arago sont

^h Arago, comme Humboldt, n'aimait pas Lamartine. A propos de la critique de l'*Histoire des Girondins*, Humboldt écrit à Arago dans une lettre du 22 mai 1851 (Hamy, 1908, p.323-325) : « La réponse à M. de Lamartine m'a intéressé comme tout ce qui met à jour ses mensonges et ses vanités ambitieuses, comme tout ce qui peut lui causer du chagrin. Sous ce dernier rapport je me plains de te trouver beaucoup trop doux ; j'aurais voulu te voir plus féroce car après M. Ledru-Rollin que j'ai appris à détester la première fois que je l'ai vu devant ton lit, le Raphaël aux différentes manières est bien celui qui m'est le plus antipathique. »

partisans de l'abolition de l'esclavage, mais les colons se manifestent et Arago hésite par peur d'événements sanglants. Il fait appel à Schœlcher qui vient de rentrer du Sénégal le 3 mars, et celui-ci le presse d'agir au plus vite. Arago est facilement convaincu, et dicte aussitôt à Schœlcher le texte du décret reproduit dans la figure 2.12.

Arago fait signer ce décret par les autres ministres, et ajoute deux autres décrets : l'un nomme Schœlcher sous-secrétaire d'État à la Marine, et l'autre, également reproduit dans la figure 2.12, crée une commission que ce dernier présidera pour rédiger le décret d'abolition. Ce dernier décret est prêt le 23 avril et signé le 27. C'est un texte magnifique dans sa concision²⁸ :

« Le Gouvernement provisoire, considérant que l'esclavage est un attentat contre la dignité humaine ; qu'en détruisant le libre-arbitre de l'homme, il supprime le principe naturel du droit et du devoir ; qu'il est une violation flagrante du dogme républicain, « Liberté, Égalité, Fraternité » ; considérant que, si des mesures effectives ne suivent pas de très près la proclamation déjà faite du principe de l'abolition, il en pourrait résulter dans les colonies les plus déplorables désordres, décrète [...] l'abolition deux mois après la promulgation, [...] les amnisties, [...] le principe d'indemnité, [...] l'interdiction de tout trafic ou d'exploitation d'esclaves sous peine de perte de la nationalité française et de sanctions. »

De façon surprenante, l'abolition est assez facilement acceptée malgré quelques incidents ; mais il est vrai que la traite des noirs a disparu depuis une trentaine d'années, et que les esprits étaient prêts. Le délai de deux mois est même raccourci en Martinique, à la suite d'une révolte malheureusement sanglante des esclaves qui s'y trouvent.

Ainsi Schœlcher et Arago se sont-ils partagé le mérite d'une des décisions les plus emblématiques de l'éphémère Seconde République : l'un est l'inspirateur, mais l'autre a mis tout son pouvoir pour la réaliser, et ils sont inséparables.

La fin d'un rêve

Malgré la maladie qui ne le lâche pas, Arago accomplit avec efficacité ses devoirs ministériels pendant le court laps de temps qui lui est imparti. Ministre de la marine pendant moins de trois mois²⁹, il donne un important coup de pouce à la refonte progressive de la marine de

guerre, qui passe progressivement de la voile à la vapeur de 1830 à 1860, supprime les châtiments corporels, prend des mesures pour améliorer l'alimentation des équipages et introduit diverses réformes de structure durables. Ministre de la guerre pendant seulement deux mois³⁰, il sait comme pour la Marine procéder à des épurations limitées et assorties de compensations ; il renforce la garde nationale et les armées régulières et en améliore les possibilités de transport, faisant acheter près de 30 000 chevaux. Il est vrai qu'il avait acquis dans le domaine militaire une compétence reconnue par tous, et particulièrement par les marins comme l'amiral Baudin : celui-ci lui écrit le 25 novembre 1848 que son passage au pouvoir n'aurait laissé que de bons souvenirs si, trop plein de confiance en M. Schœlcher, « *il ne lui avait pas permis de bouleverser à plaisir nos colonies*³¹ ».

La plus grande satisfaction d'Arago pendant cette période est certainement d'avoir vu se réaliser son rêve de 1840 : l'instauration du suffrage universel. Les élections de l'assemblée constituante ont lieu le 23 avril 1848, au scrutin universel de liste avec possibilité de candidatures multiples. C'est le triomphe de la famille Arago. François est élu à la fois dans les Pyrénées-Orientales et à Paris, avec à peine moins de voix que Lamartine mais loin devant ses autres collègues du gouvernement. Cette fois, il choisit Paris. Étienne et Emmanuel sont également élus, et même Mathieu, le beau-frère de François, qui partage la Saône-et-Loire avec Lamartine. La dynastie Arago est non sans raison trouvée « envahissante », et le terme d'« aragocratie » apparaît. Et ce n'est pas fini : un autre honneur, redoutable celui-ci, attend François.

L'Assemblée constituante doit maintenant donner un gouvernement à la France. Elle choisit d'élire une commission exécutive de cinq membres, lesquels désigneront les ministres. Lors de l'élection, qui a lieu le 10 mai, on attendait Lamartine ; mais c'est Arago qui est en tête avec 725 voix, suivi de Garnier-Pagès (715), de Marie (702), de Lamartine qui n'a que 643 voix, et de Ledru-Rollin, le seul progressiste, qui n'en obtient que 458 (figure 2.13). C'est à Arago que revient la présidence de la Commission : le voilà donc chef de l'État ... pour sept semaines. Il est vrai qu'il réunit tous les atouts : son adhésion à la République, ses préoccupations sociales, les résultats de son action ministérielle, et bien entendu son prestige. Mais les difficultés surviennent vite, dues aussi bien aux dissensions

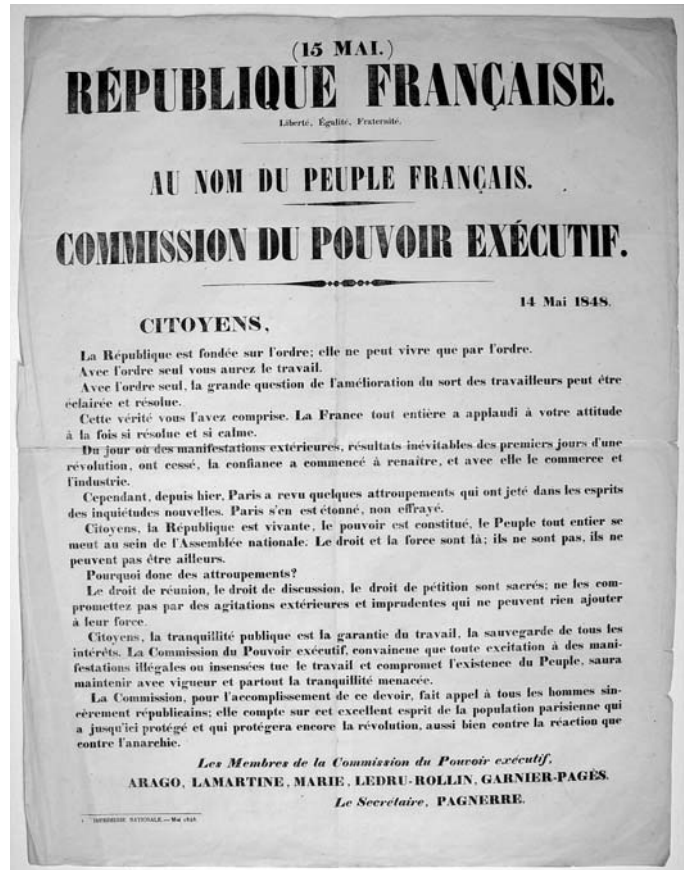


Figure 2.13. Affiche proclamant la commission du pouvoir exécutif le 14 mai 1848.

entre les hommes politiques qu'à l'action des républicains les plus avancés qui sont écartés du gouvernement, comme Albert et Louis Blanc, eux-mêmes débordés sur leur gauche par Barbès, Blanqui et Raspail. Ces derniers fomentent une insurrection que certains historiens considèrent comme une provocation orchestrée par les conservateurs. Les élections complémentaires organisées les 4 et 5 juin pour remplir 40 sièges vacants voient la victoire des clans extrêmes au détriment des républicains modérés. Louis-Napoléon Bonaparte est élu ! Lamartine tente en vain d'obtenir son bannissement mais le 13 juin l'Assemblée accepte de valider son élection : il préfère cependant démissionner en attendant son heure.

C'est alors que la commission exécutive commet l'erreur qui la conduira à sa perte : le décret du 21 juin qui dissout de fait les ateliers nationaux parisiens. Ces

ateliers, où l'on est bien payé sans faire grand chose, avaient été créés quelque temps auparavant pour résorber le chômage : dépassés par leur succès, ils mènent l'État à la banqueroute. Après la proclamation du décret, les ouvriers sont tenus de s'engager dans l'armée ou de partir en province. Cette mesure déclenche l'insurrection, dont on a quelquefois rendu Arago responsable. Les témoignages à son sujet sont contradictoires, mais il est clair qu'il a vécu cette épreuve dans l'impuissance et dans la confusion, tout en payant de sa personne pour essayer de calmer les insurgés sur les barricades. Le général Cavaignac, chargé par la commission de rétablir l'ordre, écrase brutalement l'insurrection. Dépassée, la commission exécutive s'effondre et démissionne (figure 2.14). Cavaignac assume le pouvoir exécutif à titre provisoire, jusqu'au vote de la Constitution et à l'élection du président de la République le 10 décembre : il s'y présentera mais sera éliminé par Louis-Napoléon Bonaparte. Étienne Arago reste quelque temps directeur des Postes où son action fait l'admiration, et le fils de François, Emmanuel, défendu par Humboldt, conserve son ambassade à Berlin. Ils démissionnent tous deux le 10 décembre. Quant à François, il se retire à l'Observatoire, anéanti par l'échec et de plus en plus malade. Il ne participe plus guère aux travaux de l'Assemblée. Victor Hugo en dit³² :

« Arago ne paraît plus à l'assemblée.

Quand on a ces deux spécialités de regarder le ciel et de regarder la terre, je comprends qu'on préfère la première. »

Les dernières années

Déçu par la politique et voyant son état physique se dégrader, Arago se réfugie dans la science. Il est cependant réélu député une dernière fois en mai 1849. Mathieu est balayé à Mâcon, mais dans le Midi les républicains résistent : Emmanuel est lui aussi réélu de même que quelques amis politiques. Arago ne participera plus qu'à quelques scrutins importants. Il ne visitera sa circonscription qu'en 1853, dans la phase terminale de sa maladie.

Mais son activité scientifique reste grande. Reprenant ses fonctions de secrétaire perpétuel, il reste assidu, sauf quand il est vraiment trop malade, et continue à faire des rapports, des communications, et à lire des notices

chacun en ce qui le concerne, de l'exécution
 Du présent Décret.

Fait en Conseil de Gouvernement,
 à Paris, le ~~17~~²⁷ ~~juin~~^{juillet} 1848.

Les Membres de la Commission
 Du pouvoir exécutif

~~f. Arago~~ ~~Sarrasin~~
~~Georges Dallery~~ ~~Mary~~ ~~Sarrasin~~

Le Président du Conseil chargé des
 Affaires Exécutives

Cavaignac

Le Secrétaire

Le Ministre de l'intérieur,
 Goussier

Figure 2.14. La fin
 de la commission exécutive.
 Cavaignac signe un décret
 préparé par les membres
 de la commission exécutive,
 dont les signatures
 sont biffées.

biographiques lors des séances solennelles de fin d'année. Il lit lui-même celle de son ami Poisson le 16 décembre 1850, mais doit se faire suppléer par Ernest Laugier pour celle de Gay-Lussac le 20 décembre 1852. Quant à celle de Malus, qu'il avait préparée « pour la séance publique de l'Académie des sciences de l'année 1854, [elle sera] lue [après la mort d'Arago] par décision spéciale de ce corps savant le 8 janvier 1855 », par le nouveau secrétaire perpétuel Léonce Élie de Beaumont.

Humboldt supplie Arago de regrouper ses travaux scientifiques et d'en réaliser avec son aide un « sauvetage

général » en un ouvrage qui s'intitulerait : *Astronomie, optique, physique du globe ; Fragmens recueillis par François Arago*³³. C'est ce qu'il essaiera de faire, mais seul car Humboldt est à Berlin. Comme il est devenu presque aveugle, il doit se faire aider par sa nièce Lucie Laugier, et surtout par ses collègues de l'Observatoire. Jean-Augustin Barral, l'éditeur de ses *Cœuvres complètes*, écrit³⁴ :

« C'est en 1849 que M. Arago me fit l'honneur de me faire part de son désir de publier ses *Cœuvres*.[...] Bientôt il prit le parti de dicter, d'abord à des membres de sa famille, ensuite à une personne qui pourrait lui consacrer tout son temps [ce fut d'abord Albert Terrien, puis Jean-Jacques-Émile Goujon, un des élèves astronomes de l'Observatoire]. Une grande partie des manuscrits qui ont servi à l'impression des *Cœuvres* de M. Arago est de la main de M. Goujon, qui, pendant plus de trois ans, a écrit presque tous les jours, durant près de dix heures chaque jour, sous la dictée du savant astronome. »

C'est Barral (figure 2.15) qui fait les recherches bibliographiques, et qui recueille de mémoire les textes qu'Arago improvise devant lui. Il en résultera un grand nombre de textes, soit nouveaux, soit provenant après mise à jour des Notices scientifiques publiées dans *l'Annuaire du Bureau des longitudes* : c'est sous cet état qu'elles figureront dans les *Cœuvres complètes* (figure 2.16). Arago dicte aussi les parties encore non écrites de ce qui constituera son ouvrage majeur, qui rassemble l'essentiel de ce qu'il a enseigné tout au long de sa vie : *l'Astronomie populaire*, qui sous son titre volontairement modeste est un véritable compendium des connaissances de l'époque en astronomie.

Parmi les textes nouveaux, celui du premier *Mémoire sur la photométrie*³⁵ est précédé de cette introduction pathétique :

« Le mauvais état de ma santé et l'altération profonde que ma vue a éprouvée presque subitement, m'ont inspiré le désir, j'ai presque dit m'ont imposé le devoir de procéder à une prompt publication des résultats qui, depuis longtemps, dorment dans mes cartons. Je me suis décidé à commencer par la photométrie. »

L'éthique veut que ces mémoires soient lus devant l'Académie. C'est ainsi que six des sept *Mémoires sur la photométrie* sont lus successivement le 18 mars 1850,



Figure 2.15. Jean-Augustin Barral (1819-1884), l'éditeur des *Cœuvres complètes* d'Arago.

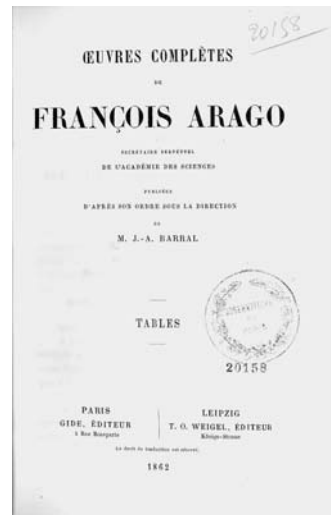


Figure 2.16. Page de titre du volume de tables des *Cœuvres complètes* d'Arago.

le 1^{er} avril, le 15 avril, le 29 avril, le 20 mai et le 17 juin. Il semble que seul le premier ait été lu entièrement par Arago, mais qu'il ait dû s'interrompre pour les trois suivants ; quant au cinquième et au sixième, ils ont probablement été lus par quelqu'un d'autre. Le septième n'a été publié qu'après sa mort dans les *Œuvres complètes*. Bien qu'une partie importante du contenu de ces mémoires ait effectivement « dormi dans des cartons », ils contiennent non seulement des résultats anciens, mais ceux d'expériences et d'observations récentes qu'il a fait réaliser par ses collègues de l'Observatoire. Jamin, Laugier, Frédéric Petit, Goujon et Mathieu sont également chargés de poursuivre d'autres expériences qu'Arago avait commencées autrefois ou décrites dans leur principe. Les résultats en seront consignés par Barral dans les *Œuvres complètes*.

En 1853, on retrouve dans ses papiers un autre mémoire datant de 1810, qu'il décide de publier dans les *Comptes rendus* « sans en changer un seul mot » bien que le sujet ait considérablement évolué depuis³⁶. Cet article traite de la vitesse de la lumière, un sujet qui l'a préoccupé toute sa vie et sur lequel il travaillait encore quelques années auparavant. Il aura la satisfaction de voir l'expérience de comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau, dont il avait eu l'idée, réalisée par Léon Foucault puis par Hippolyte Fizeau en 1850. Arago assiste aussi avec émerveillement à l'expérience du pendule que Foucault a montée à l'Observatoire en janvier 1851.

Arago continue à correspondre avec les savants de l'Europe et même de l'Amérique comme Samuel Morse, sans oublier son ami de toujours, Alexandre de Humboldt, qui dans sa perspicacité lui pose en 1849 des questions scientifiques irritantes à propos d'une erreur qu'Arago a commise concernant la vitesse de la lumière³⁷.

Mais la famille se disperse. Son frère Étienne s'enfuit en exil en 1849 et son fils Emmanuel va se marier en 1850 dans le Lot-et-Garonne. La situation politique se détériore. Après le coup d'État du 2 décembre 1852, Arago tente de faire réagir l'Académie des sciences, mais sans succès. L'Empereur décide que les fonctionnaires devront lui prêter serment sous peine de révocation. Arago y est astreint en tant que Directeur des observations, mais il s'y refuse et présente sa démission, renouvelant son geste de jeunesse vis-à-vis de Napoléon I^{er}. Sa lettre³⁸ est pleine de noblesse, mais aussi très habile : Arago menace Napoléon III de ce « qu'il devra faire part de la situation aux Académies

étrangères et à ses correspondants éminents ». On lit aussi dans cette lettre :

« Ce n'est pas sans une profonde douleur que je me séparerai de tant de beaux instruments à la construction desquels j'ai plus ou moins directement concouru ; ce n'est pas sans de vives appréhensions que je verrai des moyens de recherche, créés par moi, tomber dans des mains malveillantes ou ennemies ; mais ma conscience a parlé, et j'ai dû passer outre. »

Les « mains malveillantes ou ennemies » sont évidemment celles de Le Verrier. Victor Hugo se réjouit de l'attitude d'Arago. Il écrit en 1863 de son exil de Guernesey³⁹ :

« M. Bonaparte voulait qu'Arago jurât. Sachez cela, l'astronomie doit prêter serment. [...] L'astronomie libre est presque aussi dangereuse que la presse libre. Sait-on ce qui se passe dans ces tête-à-tête nocturnes entre Arago et Jupiter. Si c'était M. Leverrier, bien ! mais un membre du gouvernement provisoire ! [...] Il faut que le bureau des longitudes jure de ne pas conspirer avec les astres, et surtout avec ces folles faiseuses de coups d'état célestes qu'on appelle les comètes. Et puis, [...] on est fataliste quand on est Bonaparte. Le grand Napoléon avait une étoile, le petit doit bien avoir une nébuleuse ; les astronomes sont certainement un peu astrologues. Prêtez serment, messieurs. Il va sans dire qu'Arago a refusé. [...] Ah ! on veut en rire, mais tout ceci serre le cœur. [...] Prêtez serment ou mourez de faim. Ils refusent. Le silence et l'ombre où ils rentrent stoïquement savent le reste. »

Cependant, dans le cas d'Arago, Napoléon III juge politique de dispenser du serment un homme aussi célèbre, « dont les travaux ont illustré la France et dont le gouvernement ne veut point attrister l'existence ». Le Verrier devra encore attendre quelques mois ! Emmanuel est ravi de l'attitude de son père et de l'issue heureuse de l'affaire. De son exil à Bruxelles, Étienne jubile en apprenant la nouvelle par le télégraphe électrique, et envoie à son frère des félicitations en vers de mirliton.

L'état physique d'Arago empire. Un séjour à Vichy en 1851 n'aura aucun effet. Les médecins pressent Lucie de l'emmener prendre les eaux à Amélie-les-Bains, dans sa Catalogne natale. Il se rend pour la dernière fois à l'Académie le 22 août 1853, puis part à Perpignan avec Lucie. Le voyage est très pénible puisque le train ne va que



Figure 2.17. Cette image, qui montre Arago terriblement diminué physiquement, est curieusement la seule photographie que nous connaissons de ce pionnier du daguerréotype.

jusqu'à Dijon et qu'Arago souffre entre divers maux de relâchements intestinaux. Le séjour n'apporte évidemment pas non plus d'amélioration d'une maladie incurable à l'époque. Mais Arago a revu une dernière fois sa région natale tant aimée. Puis on décide de revenir à Paris. Arago commence à réaliser la gravité de son état (figure 2.17), et se désespère de ne plus pouvoir exercer ses fonctions de secrétaire perpétuel de l'Académie,

proposant d'en démissionner. Biot, réconcilié avec lui et sachant que sa fin est proche, vient le voir pour l'en dissuader. Arago meurt le 2 octobre 1853 à l'Observatoire. Humboldt, qui n'a pu venir de Berlin voir Arago qu'il savait mourant, écrit à Étienne le 6 octobre⁴⁰ :

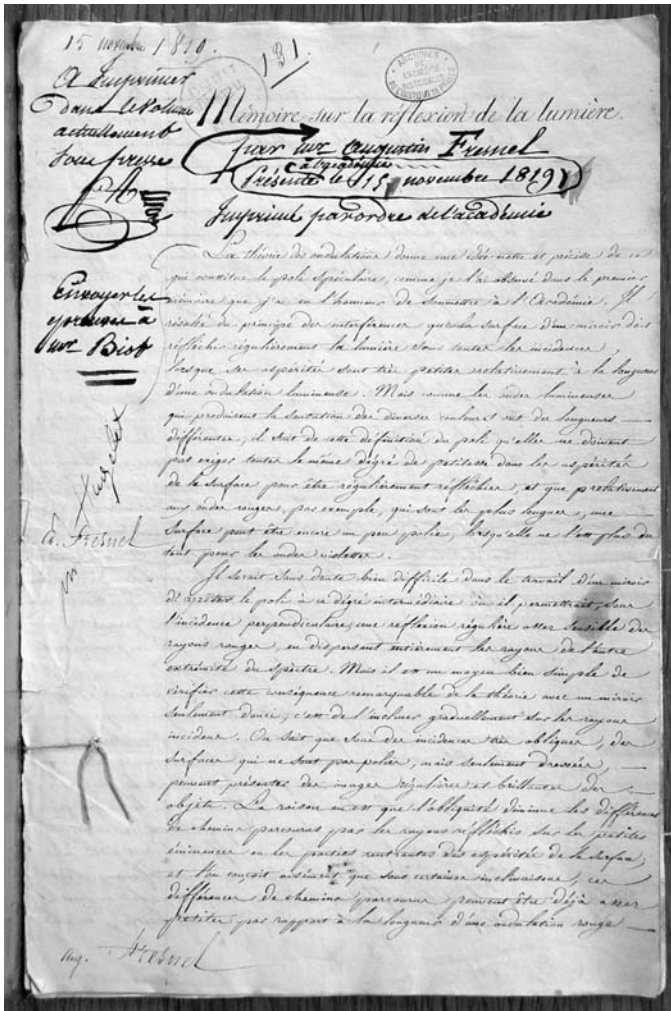
« Mille grâces des détails que vous me donnez ; cette délicatesse scrupuleuse, cet oubli de lui-même jusqu'au dernier moment de sa vie, cette parole dite à Biot, et puis cette certitude qu'il y avait absence totale de la crainte que le malade avait conscience de sa fin et que cette fin n'ait donné qu'une souffrance instantanée, cela ne console pas, mais cela individualise, cela soulage en nous faisant croire que nous assistions nous-mêmes à ce lit de douleur ... Ce qui m'afflige et ce que je redoute, c'est de voir rentrer dans ces lieux que nous avons habités M. et Mme Neptune [Le Verrier] et troubler la paix intérieure. »

Victor Hugo écrit aussi à Étienne, mais son style est bien différent⁴¹ :

« La mort d'Arago est une diminution de lumière. Son rayonnement sort de sa tombe. Voyant que tout était mort dans le pays, il a dit « Mourons ». Il est allé se coucher dans le linceul à côté de la France qui a tressailli. Votre deuil est le deuil de la République. »

Chapitre 3

La nature de la lumière



Mémoire de Fresnel paraphé par un des rapporteurs, Arago, pour publication par l'Académie des sciences.



Figure 3.1. Isaac Newton (1642-1727).

Les précurseurs : Huygens et Newton

À l'époque d'Arago, deux idées s'affrontent concernant la nature de la lumière, idées que l'on trouve toutes deux en germe de façon confuse dans la *Dioptrique* de René Descartes : ou bien la lumière est faite de corpuscules émis par les corps lumineux, hypothèse reprise par Isaac Newton (encadré 3.1, figure 3.1) dans plusieurs de ses ouvrages^a ; ou bien c'est la propagation de la vibration d'un *éther* remplissant tout l'espace, une idée explicitée par le père Francesco Maria Grimaldi et développée avec plus de force par Christiaan Huygens (encadré 3.2) dans son *Traité de la lumière* publié en 1690¹. La controverse fait rage, mais les partisans de la théorie newtonienne sont en forte majorité, plus en raison de l'immense notoriété de Newton que pour des arguments scientifiques, car Newton lui-même avait des doutes sur différents aspects de sa théorie. Seuls quelques esprits forts comme l'anglais Thomas Young ont osé s'y opposer, ce qui leur a valu de violentes critiques. Pour mieux comprendre la situation, il nous paraît intéressant de remonter aux origines, en décrivant succinctement les travaux de Newton et de Huygens et en les replaçant dans le contexte des expériences de l'époque. Il existe pour ceci un guide idéal : l'ouvrage de Vasco Ronchi, *Histoire de la lumière*², dont nous nous inspirerons largement.

Newton et Huygens ont visiblement travaillé indépendamment l'un de l'autre, bien que Huygens cite quelquefois Newton, et la question de la priorité ne se pose pas.

Newton

Bien que plus jeune que Huygens, qui ne s'est intéressé à la nature de la lumière que tardivement, Newton l'a précédé pour ce problème, ses premiers travaux datant des années 1666-1668. Ses résultats sont dispersés dans les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* de 1687³, et l'*Optique* de 1704⁴.

La partie expérimentale des travaux de Newton sur la lumière est admirable, certainement supérieure à sa partie théorique. On sait qu'il a découvert expérimentalement la dispersion de la lumière par un prisme en ses différentes

^a Ces corpuscules n'ont rien à voir avec nos modernes photons : ils étaient supposés avoir une masse.

Encadré 3.1. Isaac Newton

Newton est surtout connu par sa découverte de la loi de gravitation universelle, et par son invention, parallèlement à Leibnitz, du calcul différentiel qui lui a permis de démontrer les lois de Kepler, qui régissent le mouvement des planètes autour du Soleil. Sa mécanique est la base de tous les travaux ultérieurs dans cette discipline. Il a également inventé le télescope, et fait de belles expériences d'optique qui l'ont notamment conduit à décomposer la lumière et à construire la première théorie des couleurs. Son œuvre novatrice a profondément influencé les XVIII^e et XIX^e siècles, y compris dans ses erreurs.

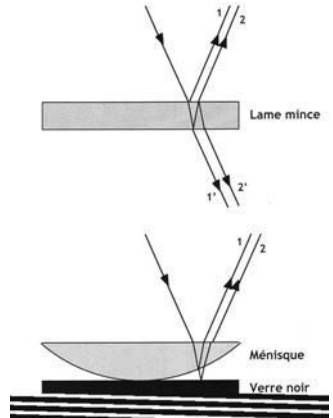


Figure 3.2. Couleurs de lame mince transparente et anneaux de Newton. En haut, la lumière qui tombe sur une lame mince se réfléchit sur la face avant et sur la face arrière, et les deux rayons réfléchis 1 et 2 interfèrent, produisant des couleurs car le déphasage entre ces deux rayons dépend de la longueur d'onde. Il y a également des couleurs de lame mince par transmission, qui correspondent aux rayons 1' et 2'. En bas, un ménisque posé sur un plan de verre (de préférence noir) produit aussi des interférences entre les rayons réfléchis 1 et 2. Les lieux où la différence de marche entre ces rayons est la même sont des anneaux concentriques. À la réflexion de l'air sur le verre, la phase change de π , si bien que le centre des anneaux est noir. Si l'on éclaire le ménisque en lumière blanche, les anneaux sont colorés pour la même raison que pour la lame mince. Si le verre plan est transparent, on peut aussi observer les anneaux de Newton par transmission.

composantes colorées, et réalisé l'expérience inverse : la recombinaison d'une lumière blanche à partir de ces composantes. Il a également décrit les couleurs obtenues en regardant une lame mince transparente par transmission ou par réflexion, et aussi les anneaux qui portent son nom, obtenus en observant par transmission ou par réflexion la lumière illuminant un ménisque convexe posé sur un plan (figure 3.2). Il a enfin reproduit les expériences de Grimaldi, qui avait découvert la diffraction⁵.

La partie théorique comporte de belles intuitions, mais aussi de grandes faiblesses ; en particulier, Newton tend à escamoter les points scabreux, mais il n'est pas le seul. Son œuvre est difficile à comprendre aujourd'hui, aussi n'en donnerons-nous pas d'extraits, nous contentant de quelques conclusions. L'idée de base est que la lumière est constituée de particules lancées à grande vitesse dans l'espace par le corps lumineux, et munies d'une masse qui dépend de la couleur. Newton explique la réfraction qui se produit lorsque la lumière pénètre d'un milieu peu dense dans un milieu plus dense par l'attraction que les particules de lumière subissent en entrant dans ce dernier milieu (figure 3.3). Après une courte période de transition qui n'occupe que très peu d'épaisseur, leur vitesse perpendiculaire à la surface de séparation augmente tandis que la vitesse parallèle est inchangée, si bien que le rayon se rapproche de la normale à la surface. Dans cette théorie, la vitesse de la lumière est donc plus grande dans un milieu plus « dense », c'est-à-dire plus réfringent, ce qui est l'inverse de ce que nous savons

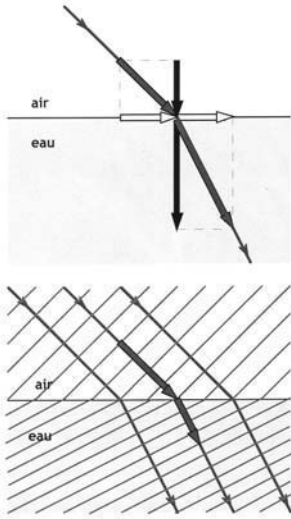


Figure 3.3. La réfraction. Pour expliquer la réfraction, la théorie newtonienne de l'émission (en haut) suppose que la vitesse de la lumière augmente à l'entrée dans le milieu dense (par exemple dans l'eau), perpendiculairement à la surface de séparation, tandis que la composante de la vitesse parallèle à cette surface ne change pas ; la vitesse de la lumière est donc plus grande dans le milieu dense. La théorie ondulatoire, qui est celle que nous connaissons aujourd'hui, suppose la continuité des plans d'onde, perpendiculaires à la direction de propagation de la lumière, lorsque l'on passe d'un milieu à l'autre (en bas ; comparer à la figure 3.7 plus loin). On voit que dans ce cas la vitesse de la lumière est plus petite dans le milieu le plus dense, où les plans d'onde sont plus serrés.

aujourd'hui. Le rapport des sinus de l'angle d'incidence et de l'angle de réfraction est alors égal à l'inverse du rapport des vitesses des corpuscules avant et après la traversée de la surface. La dispersion de la lumière est due à la masse des différentes particules : si leur masse est plus grande, elles sont plus attirées par le milieu dense, donc davantage réfractées. Mais pour Newton, la dispersion est proportionnelle à l'indice de réfraction, alors que nous savons qu'il n'en est rien. Quant à la réflexion, Newton l'explique par un argument qui n'en est pas un : les particules ont une « disposition » propre qui fait que certaines pénètrent d'un corps dans l'autre et d'autres sont rejetées !

Ayant trouvé expérimentalement les lois qui régissent ses anneaux, Newton entreprend de les expliquer à partir de cette « disposition », qui serait censée changer selon le rayon de telle manière que la lumière soit réfléchie pour certains rayons, pas pour d'autres. Ici, la faiblesse de sa théorie apparaît de façon flagrante ; mais il ne veut pas se l'avouer et persiste. Il dit par exemple, à propos des couleurs que l'on voit si l'on fait des anneaux en lumière blanche : « *Je m'abstiens de traiter de ces couleurs, car elles paraissent difficiles à expliquer* ».

Ses tentatives d'explication des phénomènes de diffraction ne sont pas plus convaincantes. Il finit par abandonner la partie, en laissant à d'autres le soin de continuer les recherches, mais sans avouer son échec. Il est curieux que Newton ait affirmé à plusieurs reprises que les rayons de lumière sont également doués d'une propriété oscillatoire, mais sans en tirer les conséquences. Et pourtant la plupart de ses expériences ne peuvent s'interpréter que dans le cadre d'une théorie ondulatoire.

Il est difficilement explicable qu'une théorie aussi chancelante et souvent en désaccord avec l'expérience de celle des corpuscules ait pu convaincre une grande partie des physiciens du XVIII^e siècle et même, nous le verrons, du début du XIX^e. Il est vrai qu'elle rend compte sans difficulté particulière de la propagation rectiligne de la lumière, de la réfraction et de la dispersion, qui sont des phénomènes bien plus familiers que les interférences et la diffraction. En France, elle a été fortement supportée par Laplace, dont l'influence était immense, et l'adoption progressive de la théorie ondulatoire a coïncidé avec la diminution de son influence au profit de celle d'Arago⁶.

Huygens

Encadré 3.2. Christiaan Huygens⁷

Né à La Haye dans une famille fortunée et très instruite (son père Constantin était secrétaire du Prince d'Orange), Huygens est en contact avec les principaux savants de son époque, notamment Descartes. Il invente l'horloge à pendule et l'échappement à ancre qui rend cette horloge précise. Grâce à une lunette de sa construction découvre les anneaux de Saturne et son satellite Titan. Invité par Colbert à Paris en 1666, il participe aux travaux de l'Académie royale des sciences qui vient d'être créée. C'est pendant son séjour en France qu'il effectue ses travaux sur la lumière, qui font l'objet de plusieurs Mémoires de l'Académie. Après son retour aux Pays-Bas en 1681, il les réunit dans son *Traité d'Optique*, publié en 1690.



Figure 3.4. Christiaan Huygens (1629-1695).

Huygens (figure 3.4 et encadré 3.2) nous informe dans la préface de son *Traité de la lumière* de 1690 qu'il l'a écrit douze ans auparavant et l'a communiqué à ses collègues de l'Académie royale des sciences, en particulier aux « Célèbres Messieurs, Cassini, Romer [sic] et De la Hire ». Il assure qu'il l'a peu changé sauf en ce qui concerne le spath et la réfraction du quartz. Son travail date donc de 1678, mais jusqu'à 1690 il n'était probablement connu que de ces savants français. En voici quelques extraits :

« L'on ne sçauroit douter que la lumière ne consiste dans le mouvement de certaine matière. Car soit qu'on regarde sa production, on trouve qu'icy sur la Terre c'est principalement le feu & la flamme qui l'engendrent, lesquels contiennent sans doute des corps qui sont dans un mouvement rapide, puis qu'ils dissolvent & fondent plusieurs autres corps des plus solides : soit qu'on regarde ses effets, on voit que quand la lumière est ramassée, comme par des miroirs concaves, elle a la vertu de brûler comme le feu, c'est-à-dire qu'elle desunit les parties des corps ; ce qui marque assurément du mouvement, au moins dans la vraie Philosophie dans laquelle on conçoit la cause de tous les effets naturels par des raisons de mécanique. Ce qu'il faut faire à mon avis, ou bien renoncer à toute esperance de jamais rien comprendre dans la

Physique^b. [...] Quand on considère l'extreme vitesse dont la lumiere s'étend de toutes parts, et que quand il en vient de differents endroits, mesme de tout opposez, elles se traversent l'une l'autre sans s'empescher ; on comprend bien que quand nous voyons un objet lumineux, ce ne sçauroit estre par le transport d'une matiere, qui depuis cet objet s'en vient jusqu'à nous, ainsi qu'une bale ou une fleche traverse l'air. »

Il décrit ensuite la propagation de la lumière comme celle d'un ébranlement dans un milieu matériel, l'éther (Encadré 3.3), formé comme de boules qui se touchent ; mais il élude la question de la nature de l'éther :

« [...] rien n'empêche que nous n'estimions les particules de l'éther estre d'une matiere si approchante de la dureté parfaite & d'un ressort si prompt que nous voulons. Il n'est pas necessaire pour cela d'examiner icy la cause de cette dureté, ny de celle du ressort, dont la consideration nous meneroit trop loin de nostre sujet. »

Encadré 3.3. L'éther

La signification du terme « éther » a considérablement varié au cours du temps. Au xvii^e siècle, l'éther est conçu comme un « milieu subtil » remplissant tout l'Univers, qui doit permettre la propagation de la lumière tout en restant généralement immobile. On trouve l'éther chez Descartes et chez les tenants de la nature vibratoire de la lumière comme Francesco Maria Grimaldi, Robert Hooke, Ignace-Léon Pardies et bien entendu Huygens. Même Newton, qui n'en n'a pas besoin dans sa théorie corpusculaire de la lumière, ne peut imaginer son absence et pense qu'il peut servir à la propagation d'ondes interagissant avec les corpuscules lumineux. D'ailleurs, il suppose que la gravitation implique l'existence d'un « fluide éthéré gravifique ». Pour lui, l'éther constitue le repère absolu des mouvements dans l'Univers, une idée acceptée par tous jusqu'à Einstein. La théorie ondulatoire de Young et de Fresnel n'a fait que

^b Cette conception mécaniste de la lumière sera celle de tout le monde jusqu'à la fin du xix^e siècle.

renforcer l'idée d'un éther où se propageraient les ondes lumineuses, considérées d'abord comme longitudinales puis comme transversales. Un texte de 1812 énumère différentes sortes de « fluides éthérés » dont la distinction avec l'éther proprement dit n'est pas claire : le feu, ou fluide calorique, le lumineux, l'électrique, le magnétique et le gravifique⁸. Un autre texte de 1842 attribue à l'éther presque tous les phénomènes physiques⁹. Pour Faraday encore, l'éther sert de support aux champs électriques et magnétiques dont il a imaginé l'existence. Poursuivant cette idée, Maxwell développe une théorie des « tourbillons moléculaires de l'éther » dont l'énergie cinétique représente l'énergie magnétique et l'énergie potentielle de déformation, l'énergie électrique. Bien entendu, le problème de la nature matérielle de l'éther s'est posé à tous ces stades, de façon de plus en plus embarrassante à mesure que l'idée s'est précisée : l'éther doit être à la fois fluide et rigide, ce qui est contradictoire. Ceci a fini par décourager des scientifiques comme William Thomson (Lord Kelvin) qui après cinquante années de recherches avouera n'y rien comprendre. Avec la relativité restreinte, l'éther perd en 1905 une de ses principales prérogatives : celle d'être un système de référence absolu. Comme on a également compris que les champs électrique et magnétique n'ont pas besoin de support matériel et que les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide, la notion d'éther perd tout contenu et n'a plus de raison d'être.

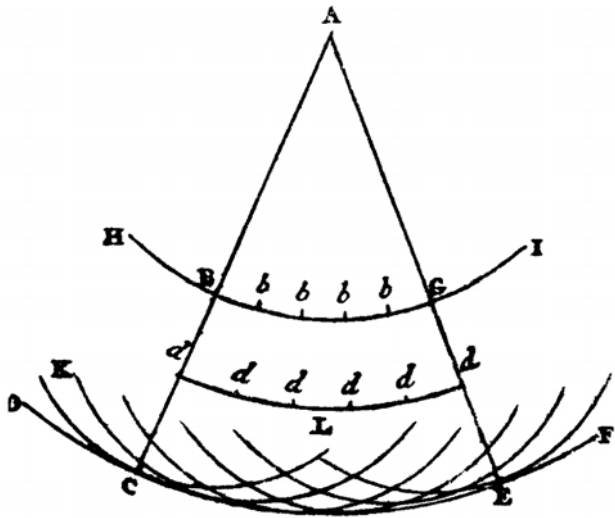
Ensuite, Huygens stipule que chaque particule d'éther traversé par la lumière produit sa propre onde sphérique très faible. Ces ondes se propagent indépendamment les unes des autres. Mais il est extraordinaire que des ondes émises par des sources aussi petites puissent être perçues à grande distance. Quelle est la solution de ce paradoxe apparent ?

« On cessera de s'étonner en considérant que dans une grande distance du corps lumineux une infinité d'ondes, quoique issues de points differens du corps, s'unissent en sorte que sensiblement elles ne composent qu'une onde seule, qui par consequent doit avoir assez de force pour se faire sentir. »

La figure 3.5 montre que Huygens conçoit cette onde totale comme étant l'enveloppe de ces ondes élémentaires, laquelle est une sphère ayant la source pour centre (ou un plan si la source est à l'infini) : c'est le *principe d'Huygens*, qui sera repris ensuite par Fresnel sous une forme plus claire si bien qu'on le désigne quelquefois aujourd'hui sous le nom de *principe d'Huygens-Fresnel*. Huygens commente :

« [...] l'on verra dans la suite, que toutes les propriétés de la lumière, & tout ce qui appartient à sa réflexion et à sa réfraction, s'expliquent principalement par ce moyen. C'est ce qui n'a point été connu à ceux qui cy-devant ont commencé à considérer les ondes de lumière, parmi lesquels sont Mr. Hook [Hooke] dans sa *Micrographie*¹⁰, & le P. Pardies, qui dans un traité dont il me fit voir une partie ; & qu'il ne pût achever étant mort peu de temps après, avoit entrepris de prouver par ces ondes les effets de la réflexion et de la réfraction. »

Figure 3.5. Le principe d'Huygens (gravure de son *Traité de la lumière*, comme les deux figures suivantes). Chaque point *bbb* d'une surface d'onde comme *BG* émet une onde sphérique très faible, et on ne perçoit que l'enveloppe *CE* de ces ondes, qui est une nouvelle surface d'onde.



Huygens tente alors de montrer que la propagation en ligne droite est le corollaire de son idée d'enveloppe, ce à quoi il ne parvient pas vraiment. En revanche, il donne de la réflexion et de la réfraction des démonstrations qui sont toujours d'actualité (figure 3.6, figure 3.7). En particulier,

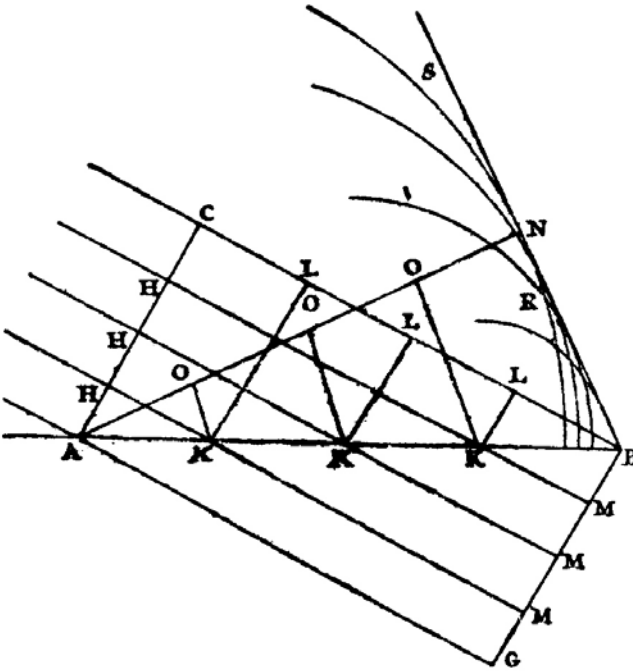


Figure 3.6. La réflexion selon Huygens. Les plans d'onde incidents équidistants AC et KL atteignent la surface de séparation des deux milieux en des points également équidistants AKKK, qui émettent des ondes sphériques, lesquelles se propagent avec la même vitesse que la lumière incidente ; l'enveloppe de ces ondes est un plan d'onde réfléchi.

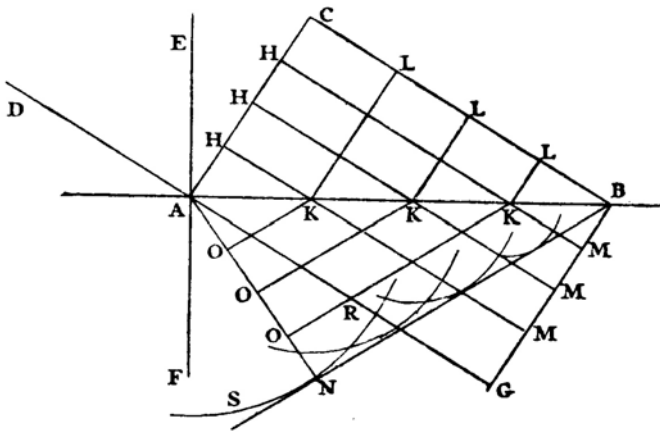


Figure 3.7. La réfraction selon Huygens. Les plans d'onde incidents équidistants AC et KL atteignent la surface de séparation des deux milieux en des points également équidistants AKKK, qui émettent des ondes sphériques, lesquelles se propagent dans le milieu dense avec une vitesse plus faible que dans le milieu ténu ; l'enveloppe de ces ondes est un plan d'onde réfracté. Comparer à la figure 3.3.

il explique que la réfraction de la lumière qui pénètre de l'air dans un milieu transparent plus dense est due à une diminution de la vitesse de la lumière :

« [...] l'on conçoit aisément que [dans les corps transparents] les ondes puissent estre continuées dans la matiere

etherée qui remplit les interstices des particules. Et de plus l'on peut croire que le progres de ces ondes doit estre un peu plus lent au-dedans des corps, à raison des petits detours que causent les mesmes particules. Dans laquelle différente vitesse de la lumière, je feray voir que consiste la cause de la refraction. »

Il est dommage que Huygens n'ait pas appliqué son principe à la diffraction, car c'est là qu'il se révèle le plus fécond : ce devait être réservé à Fresnel.

Huygens remarque enfin que les ondes de lumière venant de différents points ne se détruisent pas. Cette erreur lui aurait interdit de comprendre les phénomènes d'interférence s'il les avait connus. Malgré cela, Huygens a fait en général preuve de remarquables intuitions sur la nature de la lumière. Ces intuitions n'ont cependant été accompagnées que de démonstrations souvent imparfaites, et n'ont pas convaincu certains critiques attentifs.

Controverses

Huygens était certes un savant respecté, mais Newton avait acquis une gloire encore plus grande en créant la mécanique céleste, et la mécanique tout court. Aussi ne faut-il pas s'étonner que sa théorie corpusculaire ait connu un succès considérable, et que le grand public et beaucoup de savants du XVIII^e siècle aient été newtoniens¹¹. Parmi les partisans de la théorie ondulatoire, on compte Leonhard Euler, lui-même auteur en 1746 d'une théorie de la lumière qui va plus loin que celle de Huygens¹². Il écrit¹³ :

« Newton a été sans contredit un des plus grands génies qui ait jamais existé ; et sa profonde science et sa pénétration dans les mysteres les plus cachés de la nature, demeurera toujours le plus éclatant sujet de notre admiration et de celle de notre postérité ; mais les égaremens de ce grand homme doivent servir à nous humilier et à reconnoitre la faiblesse de l'esprit humain, qui s'étant élevé au plus haut degré dont les hommes soient capables, risque néanmoins souvent de se précipiter dans les erreurs les plus grossieres ».

Euler a l'intuition que les différentes couleurs pourraient correspondre à des fréquences différentes des ondes lumineuses :

« Chaque couleur simple (pour la distinguer des couleurs composées), est attachée à un certain nombre de vibrations [...] ; de sorte qu'un tel nombre de vibrations rendues dans une seconde, détermine la couleur rouge, un autre la couleur jaune, un autre la verte, un autre la bleue, et un autre la violette. »

Euler développe le parallèle entre le son et la lumière, « si parfait qu'il se soutient même dans les moindres circonstances ». Il va d'ailleurs trop loin en faisant l'analogie des différentes couleurs avec les notes de la gamme (pourpre = ut, violet = ré, orange = mi, etc.) ; ceci le conduit à proposer un cycle des couleurs par octaves, prétendant que

« deux couleurs, comme deux tons dont le nombre de vibrations de l'une est précisément le double de l'autre, passent pour la même couleur, et ont le même nom. C'est sur ce principe que le Père Castel en France, a voulu imaginer une espèce de musique des couleurs. »

L'analogie de la lumière avec le son qu'a développée Euler est loin d'être une nouveauté : elle remonte à l'antiquité. Si cette analogie a pu être féconde sur certains points, elle s'est révélée dangereuse sur d'autres comme on vient de le voir. Elle a renforcé l'idée qu'il fallait, comme pour le son, un support matériel pour propager la lumière, en l'occurrence l'éther, et elle a rendu difficile à concevoir et à faire adopter l'idée que la lumière puisse être une vibration transversale, puisque le son est une onde longitudinale.

Thomas Young

L'idée que la lumière est une vibration est un des résultats fondamentaux obtenus par Thomas Young (Encadré 3.4). Lecteur attentif des œuvres de Newton, Young (figure 3.8) remarque d'abord que celui-ci avait lui-même convenu avoir rencontré des difficultés pour rendre compte par sa théorie de différents phénomènes, et qu'il était moins sûr de cette théorie qu'il n'y paraissait¹⁵ :

« Les observations optiques de Newton sont encore sans rivales ; et, en faisant abstraction de quelques inexactitudes occasionnelles, elles ne peuvent que croître dans notre estime si on les compare aux essais ultérieurs faits dans le but de les améliorer. Un examen plus approfondi des



Thomas Young

Figure 3.8. Thomas Young (1773-1829).

Encadré 3.4. Thomas Young¹⁴

Né en 1773 à Milverton en Angleterre, Young est un enfant prodige : on dit qu'il savait lire à l'âge de deux ans et parlait dix langues à 16 ans. À 19 ans, il entreprend des études de médecine, et, son travail sur la vision ayant été très remarqué, entre à 21 ans à la *Royal Society*. Il en devient *Foreign Secretary* en 1802, poste qu'il occupera jusqu'à sa mort. En 1800, il est nommé Professeur de Philosophie naturelle (nous dirions aujourd'hui : physique) à la *Royal Institution* de Londres, où il donne des cours devant un large auditoire ; mais il est probable que seuls quelques spécialistes peuvent vraiment les comprendre. Young est un savant universel, dont les contributions à la médecine, à l'égyptologie et à la philologie sont impressionnantes. En physique, il est le premier à désigner par le terme d'énergie la quantité mv^2 , où m et v sont la masse et la vitesse d'un corps, et appelle *travail accompli* (*work done*) la quantité $F \times d$, où F est une force dont le point d'application se déplace de la distance d . Il est surtout célèbre par sa découverte des interférences et ses autres travaux sur la lumière, qui malheureusement n'impressionneront guère la communauté scientifique de l'époque et lui vaudront de violentes critiques.

couleurs des lames minces, telles qu'elles sont décrites dans le second livre de l'Optique de Newton, a transformé l'intérêt que j'avais auparavant pour le système ondulatoire de la lumière en une conviction très forte qu'elle est vraie et suffisante, une conviction qui a depuis été confirmée de façon frappante par l'analyse des couleurs des substances striées^c. [...] »

Un examen plus complet des différents écrits de Newton m'a montré qu'il fut en réalité le premier à suggérer la théorie que je m'attache à défendre ; que ses propres opinions différaient moins de cette théorie que ce que l'on suppose aujourd'hui presque universellement ; et que les arguments variés qui ont été avancés pour le réfuter peuvent être trouvés presque sous la même forme dans ses propres travaux. »

^c C'est-à-dire des réseaux de diffraction.

Dans le même article, Young, visiblement désireux de convaincre un lectorat essentiellement newtonien, réunit ensuite un certain nombre de textes de Newton qui vont dans ce sens, et cite même Newton, plutôt paradoxalement, pour les trois premières des quatre hypothèses suivantes :

« *HYPOTHÈSE I*

Un éther permettant la propagation de la lumière remplit l'univers, ténu et élastique à un degré élevé.

HYPOTHÈSE II

Des ondulations sont excitées dans cet éther chaque fois qu'un corps devient lumineux.

Scholie [remarque] : J'utilise le terme d'ondulation plutôt que de vibration parce qu'on comprend généralement par vibration un mouvement alternatif [...] qui est naturellement plus ou moins permanent ; tandis qu'une ondulation est supposée être un mouvement vibratoire transmis successivement à différentes parties d'un milieu, sans qu'aucune particule ait tendance à continuer son mouvement, sauf comme conséquence de la transmission d'ondulations successives provenant d'un corps vibrant distinct ; de même que dans l'air les vibrations d'une corde produisent les ondulations qui constituent le son.

HYPOTHÈSE III

La sensation des différentes couleurs dépend des différentes fréquences des vibrations excitées par la lumière sur la rétine^d.

HYPOTHÈSE IV

Chaque corps matériel attire le milieu éthéré de telle façon qu'il s'accumule à l'intérieur de ce corps et à une petite distance autour de lui, dans un état de densité plus grande mais avec la même élasticité.[Ceci pour expliquer la réfraction.] »

^d Young est le premier à avoir proposé que la vision des couleurs repose sur trois couleurs primaires, dont chacune excite des « résonateurs » particuliers dans la rétine, en fait des photopigments ou *opsines*. Sa théorie a été redécouverte et modifiée par Hermann von Helmholtz un demi-siècle plus tard, et est aujourd'hui connue sous le nom de théorie de Young-Helmholtz.

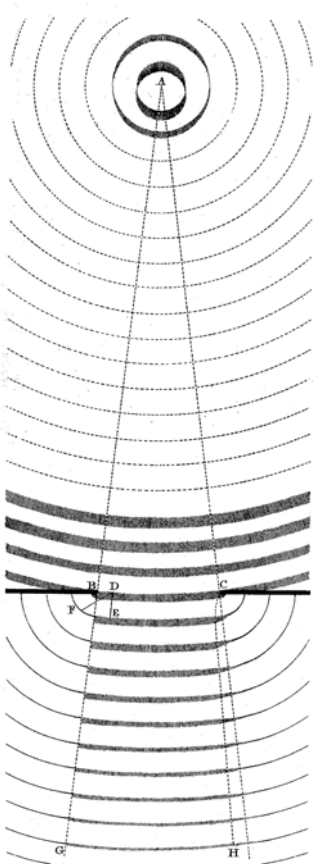


Figure 3.9. La diffraction selon Young. Les ondes sphériques issues d'une source ponctuelle A traversent un trou BC : la propagation continue sans encombre au centre, mais la diffraction produit des ondes centrées sur les bords du trou.

Young continue en exposant son système par une série de propositions, dont voici les principales :

« *PROPOSITION I*

Toutes les impulsions se propagent à la même vitesse dans un milieu homogène élastique.

[Par analogie avec le son, pour lequel c'était connu. Cependant Young prétend qu'Euler disait que la vitesse du son était d'autant plus grande que sa fréquence était plus élevée.]

PROPOSITION II

Une ondulation qui provient de la vibration d'une seule particule doit se répandre sous forme sphérique dans un milieu homogène, mais avec des quantités de mouvement différentes dans les différents endroits.

[Young semble faire ici allusion à la diminution d'intensité d'une onde sphérique avec son rayon. Mais ses explications sont assez confuses].

PROPOSITION III

Une portion d'une ondulation sphérique qui passe à travers une ouverture dans un milieu au repos, continuera à se propager en ligne droite selon des surfaces sphériques, qui se terminent latéralement par des portions faibles et irrégulières de nouvelles ondulations divergentes.[...] Le sujet de cette proposition a toujours été considéré comme la partie la plus difficile du système ondulatoire.

[La figure 3.9 illustre cette proposition dont l'exposé est peu clair : la lumière passe par un trou assez large et continue sans changement dans les parties centrales, mais est diffractée par les bords sous forme d'ondes sphériques centrées sur le bord et se raccordant aux ondes non affectées.]

PROPOSITION IV

Quand une ondulation arrive sur une surface qui sépare des milieux de densité différente, il y a réflexion partielle dont l'intensité dépend de la différence des densités.

PROPOSITION V

Quand une ondulation traverse une surface qui sépare des milieux différents, sa direction est telle que les sinus des angles

d'incidence et de réfraction sont dans le rapport constant de la vitesse de propagation dans les deux milieux.

[Il ajoute cependant que le rapport est inverse de celui de la densité des milieux, ce qui revient à dire que l'indice de réfraction est proportionnel à la densité ; on trouve la même erreur dans l'ensemble de la littérature de l'époque, y compris dans les premiers écrits de Fresnel.]

PROPOSITION VI

Quand une ondulation tombe sur la surface d'un milieu moins dense, de façon tellement oblique qu'elle ne peut être réfractée, il y a réflexion totale avec un angle égal à l'angle d'incidence.

PROPOSITION VII

Si des ondulations équidistantes passent dans un milieu dont les parties sont susceptibles de vibrations un peu plus lentes que les ondulations, leur vitesse sera un peu diminuée par la tendance vibratoire [sic] ; et, dans un milieu donné, d'autant plus que les ondulations sont plus rapides.

[Young essaie ainsi de rendre compte de la dispersion, mais visiblement sans trop y croire.]

PROPOSITION VIII

Quand deux ondulations d'origine différente ont des directions qui coïncident parfaitement ou presque, leur effet commun est une combinaison des mouvements de chacune d'elles.

[Young commente comme suit :] *Puisque chaque particule du milieu est affectée par chaque ondulation, chaque fois que les directions coïncident, les ondulations joignent nécessairement leurs mouvements, si bien que le mouvement résultant peut être la somme ou la différence des mouvements individuels, selon que ce sont des parties semblables ou opposées des ondulations qui coïncident. [Il ajoute :] Les ondulations qui sont comparées ici sont celles de même fréquence. Quand les deux séries coïncident exactement à un instant donné, il est évident que la vitesse combinée des mouvements particuliers doit être maximale, et, au moins par son effet [?], est la somme des vitesses séparées : et en revanche qu'elle doit être minimale, et même nulle si les ondulations ont la même force, lorsque l'instant*

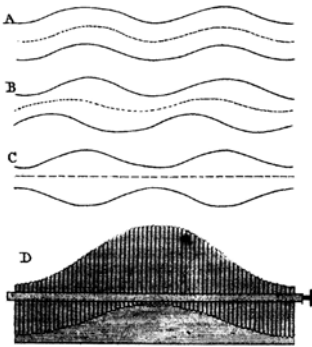


Figure 3.10. Modèle mécanique de Young démontrant l'interférence des ondes. Dans ce modèle (en bas), des tiges verticales, dont la longueur suit une sinusoïde, glissent sur une sinusoïde de même période et de même amplitude. Le haut des tiges dessine une sinusoïde d'amplitude variable selon la configuration (ici, l'amplitude est maximum). Au-dessus, Young en montre quelques exemples.

où le mouvement direct maximal d'une ondulation coïncide avec celui du mouvement inverse maximal de l'autre. Dans les situations intermédiaires, l'ondulation conjointe sera de force intermédiaire ; mais on ne peut déterminer la loi de variation de cette force intermédiaire sans données supplémentaires. »

Cette combinaison des ondes, bien que soupçonnée par Newton dans ses *Principia* à propos de la combinaison d'ondes de marée dans la région de Haiphong au Vietnam, paraît visiblement une nouveauté, d'où les commentaires. Young, qui l'a bien comprise et l'a étendue aux ondes sonores et lumineuses, a d'ailleurs réalisé un modèle de démonstration montrant l'interférence constructive et destructive des ondes (figure 3.10)¹⁶.

Deux des corollaires à la huitième proposition sont d'un grand intérêt. Dans le *corollary I*, Young fait part d'observations avec un réseau (en fait un micromètre dont les traits parallèles étaient distants de 0,25 mm), qui montrent qu'il a vu les différents ordres d'interférence et compris la loi correspondante. Il a dû observer également la dispersion, mais sa phrase concernant les couleurs n'est pas claire. Le *corollary II* explique correctement les couleurs des lames minces et donne, en utilisant les observations de Newton, de bonnes valeurs pour la longueur d'onde et la fréquence des différentes couleurs, par exemple 0,49 micromètre et $6,29 \cdot 10^{14}$ hertz pour le bleu.

Dans un article ultérieur¹⁷, Young décrit des phénomènes de diffraction colorée par des fils, et calcule des différences de marche. Il remarque que l'on voit un halo dû à la diffraction si l'on observe une lumière à travers un paquet de fils fins, et ajoute :

« Il ne peut y avoir guère de doute que les halos atmosphériques colorés sont de même nature ; leur apparence doit dépendre de l'existence d'un nombre de particules d'eau de dimensions égales, qui sont placées dans une position appropriée par rapport au luminaire et à l'œil, »

ce qui est en grande partie faux : seuls les arcs-en-ciel surnuméraires que l'on peut voir dans de bonnes conditions au bord interne de l'arc principal sont des phénomènes de diffraction ; l'arc lui-même, comme l'avait montré Descartes, et les halos résultent d'une combinaison de réflexion et de réfraction dispersive dans des gouttes d'eau ou des cristaux de glace.

Young s'attaque également aux anneaux de Newton (figure 3.2), constatant qu'ils sont considérablement élargis lorsque l'air est remplacé par l'eau entre le plan et le ménisque convexe qui est placé en contact avec lui ; il en donne une explication qualitative, qui s'applique aussi à des expériences sur les lames minces. Il écrit à ce sujet :

« Je dois confesser qu'il est impossible d'éviter une hypothèse, qui fait partie de la théorie ondulatoire : que la vitesse de la lumière est plus grande dans les milieux moins denses ; et qu'il y a aussi une condition pour rendre compte de la couleur des lames minces, qui fait intervenir une autre partie de la même théorie, qui est que lorsqu'une des portions de la lumière a été réfléchiée à la surface d'un milieu moins dense, il faut supposer qu'elle est retardée de la moitié de l'intervalle [de temps] approprié ; par exemple, dans la tache noire centrale d'une bulle de savon, où les longueurs réelles des chemins [optiques] coïncident presque, mais l'effet est le même que si l'une des portions de la lumière avait été retardée de manière à détruire l'autre. »

Young a donc compris que la vitesse de la lumière est plus grande dans un milieu moins dense^e, ce que Huygens avait déjà remarqué, et qu'il y a changement de phase d'une demi-longueur d'onde dans la réflexion sur un milieu d'indice plus élevé.

Sa publication de 1804 est consacrée à des expériences d'interférences¹⁸. Il illumine à partir d'un petit trou percé dans un carton et éclairé par le Soleil une bande étroite (0,8 mm) de carton, et constate que l'on voit dans l'ombre de cette bande des franges d'interférence en plus des franges de diffraction colorées à l'extérieur de l'ombre^f : voir plus loin la figure 3.27, qui est assez semblable à celle de Young. Lors d'une visite à Young en 1816, Arago découvre la similitude entre ces deux schémas, celui de Young ayant été publié en 1807 dans son livre *A course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. Young montre que ces phénomènes s'expliquent bien avec la théorie ondulatoire, mais mal avec l'« hypothèse des projectiles », c'est-à-dire avec la théorie de Newton. Il met aussi en garde contre les artefacts que la diffraction

^e Dans l'original : *rarer* ; nous dirions aujourd'hui : d'indice de réfraction moins élevé.

^f Cette expérience est souvent désignée de façon impropre comme étant l'expérience des trous ou des fentes d'Young.

et les interférences peuvent produire dans les observations microscopiques :

« Une tache noire centrale ou une tache lumineuse entourée d'un cercle plus sombre peuvent être produites respectivement dans l'image d'un corpuscule semi-transparent ou opaque, et nous donner l'impression d'une structure complexe qui n'existe pas. »

Il décrit également une expérience d'anneaux de Newton en rayons ultraviolets (que l'on appelait alors les « rayons de Ritter », découverts en 1801 par leurs effets photochimiques), où la détection se fait grâce à un papier imbibé de nitrate d'argent, et dit :

« L'expérience [...] est suffisante pour compléter l'analogie des rayons invisibles avec les rayons visibles, et pour montrer qu'ils obéissent aussi à la loi générale qui est le sujet principal de cet article. Si nous avions des thermomètres suffisamment délicats, il est probable que nous pourrions acquérir, par des moyens semblables, une information encore plus intéressante en ce qui concerne les rayons de chaleur invisible découverts [en 1800] par le Dr. Herschel ; mais à l'heure actuelle il y a de fortes raisons de douter de la faisabilité d'une telle expérience⁸. »

Young réalise enfin l'expérience classique d'interférences lumineuses qui porte son nom¹⁹ : en faisant passer la lumière issue d'un petit trou à travers deux autres petits trous percés à peu de distance l'un de l'autre dans une feuille de carton, il obtient des franges d'interférence dans la partie commune des cônes de lumière, divergents par suite de la diffraction, qui sont issus de ces deux trous (figure 3.11). Il indique également que l'on peut remplacer ces deux trous par des fentes.

Malgré un style un peu confus qui contraste avec la clarté des écrits ultérieurs de Fresnel, on constate que Young a fait faire à l'optique physique des progrès

⁸ Il s'agit bien entendu de l'infrarouge. Plusieurs expériences dont des expériences d'interférences devaient être réalisées en 1846 avec des thermomètres très fins par Léon Foucault et Hippolyte Fizeau : voir Tobin W. (2002) p. 71. Malgré la remarquable intuition de Young, on a mis très longtemps à comprendre que l'ultraviolet et l'infrarouge sont simplement des ondes (électromagnétiques) de longueur d'onde respectivement plus courte et plus longue que la lumière visible. Nous en reparlerons à la fin de ce chapitre.

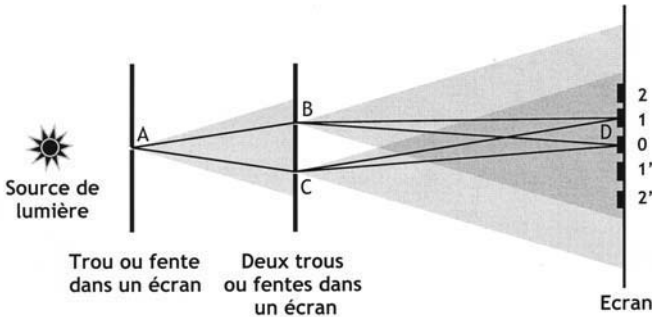


Figure 3.11. Interférences produites par les trous de Young. Une source de lumière illumine un petit trou (ou une fente étroite) A, qui par diffraction éclaire deux autres trous (ou fentes) B et C (gris clair). Les faisceaux produits par la diffraction à partir de ces deux trous interfèrent dans leur partie commune (gris foncé). Un écran permet de voir les franges ainsi formées : franges brillantes lorsque les trajets ABD et ACD sont égaux (ordre 0) ou différent d'un nombre entier de longueurs d'onde (ordre 1, 2, etc.), ou franges sombres entre les deux. En lumière blanche, les franges d'ordre 1 et plus sont brouillées et colorées.

considérables : il a réussi à expliquer par la théorie ondulatoire les interférences et dans une grande mesure la diffraction, ainsi que les propriétés des lames minces, des anneaux de Newton et des réseaux. L'essentiel est là, mais il manque la polarisation, et l'on ne sait pas encore si la lumière est une vibration longitudinale ou transversale : ce devait être l'œuvre de la génération suivante.

Malheureusement, les exposés de Young, qui ne sont ni systématiques ni précis, ne suffiront pas à ébranler l'opinion générale qui était en faveur de la théorie corpusculaire. Il sera violemment attaqué, en particulier dans l'*Edinburgh Review* par le très influent Lord Brougham, et ses répliques, bien que fondées, seront sans effet. Les travaux de Young resteront en conséquence mal connus de notre côté de la Manche, où de surcroît on lit peu l'anglais.

La polarisation de la lumière

Qu'est-ce que la polarisation ?

Nous savons aujourd'hui que la lumière est une onde transversale électromagnétique (figure 3.12). Transversale, parce que la vibration de l'onde est dirigée perpendiculairement à la direction de propagation (ce n'est pas le cas pour une onde sonore, qui correspond à la propagation de zones de compression dans la direction de propagation : on parle alors d'onde longitudinale). Électromagnétique, parce que la lumière est formée d'un champ électrique et d'un champ magnétique simultanés ; ces deux champs sont perpendiculaires l'un à l'autre, et varient ensemble avec une fréquence qui caractérise la couleur de la lumière.

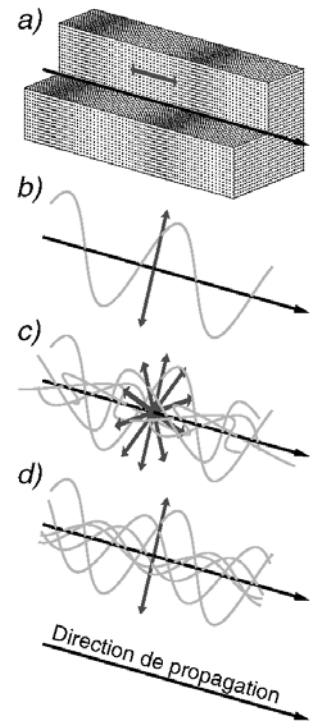


Figure 3.12. Ondes longitudinales et transversales. (a) Une onde longitudinale est formée d'une série de compressions et de raréfaction du milieu qui avancent dans la direction de l'onde. (b) Dans une onde transversale, les vibrations sont perpendiculaires à la direction de propagation. (c) Un faisceau de lumière naturelle (non polarisée) se compose de vibrations d'amplitude et d'orientation aléatoires (on en a représenté cinq). (d) Faisceau de lumière polarisée obtenu par un polariseur à partir du précédent : il contient la composante projetée sur le plan de polarisation de chacune des vibrations précédentes.

Habituellement, les champs électrique et magnétique de l'onde ont une orientation qui varie continuellement de façon aléatoire autour de la direction de propagation (figure 3.12 c). On dit alors que la lumière est naturelle, puisque c'est de loin le cas le plus fréquent dans la nature.

Les dispositifs appelés *polariseurs* ne laissent passer que la composante du champ électrique qui est dirigée dans une certaine orientation (figure 3.12 d). La lumière est alors dite *polarisée*, et l'orientation du champ électrique autour du rayon lumineux est dite *direction de polarisation*. Si l'on regarde une lumière polarisée à travers un autre polariseur (appelé pour la circonstance *analyseur*), elle est atténuée si les directions privilégiées du polariseur et de l'analyseur ne sont pas parallèles, et on ne voit plus rien si elles sont perpendiculaires l'une à l'autre (figure 3.13).

Le spath d'Islande

Le spath d'Islande est un cristal transparent de carbonate de calcium, qui est doté de propriétés optiques extraordinaires sur lesquelles se sont penchés un grand nombre de physiciens des XVII^e et XVIII^e siècles (figure 3.14). Elles ont été décrites pour la première fois en 1669 par Erasme Bartholin, professeur de mathématiques et de médecine à l'université de Copenhague, qui avait reçu de marchands danois un échantillon de ce matériau²⁰. Bartholin observe la double réfraction, qui donne d'un objet deux images semblables, constate que l'une de ces images qu'il appelle *ordinaire* ne change pas quand on tourne le cristal autour d'un axe parallèle à la direction d'arrivée de la lumière, et que l'autre, mobile, « *révèle une sorte extraordinaire de réfraction [...] qui est contraire aux lois de la réfraction habituelle* ».

Le spath d'Islande est un polariseur : il décompose un rayon incident en deux rayons polarisés perpendiculairement l'un à l'autre, comme l'indique la figure 3.15. Huygens a remarqué en 1678 qu'en regardant un objet proche à travers deux spaths d'Islande successifs, ce qui donne donc quatre images, ces images s'éteignaient simultanément, deux par deux, lorsqu'il tournait un des cristaux. Il n'était pas en mesure de comprendre ce phénomène, qui est dû à ce que le premier spath est un polariseur double et le second un analyseur double, et son observation devait longtemps rester inexpiquée. Huygens écrit dans le chapitre 5 de son *Traité de la lumière* :

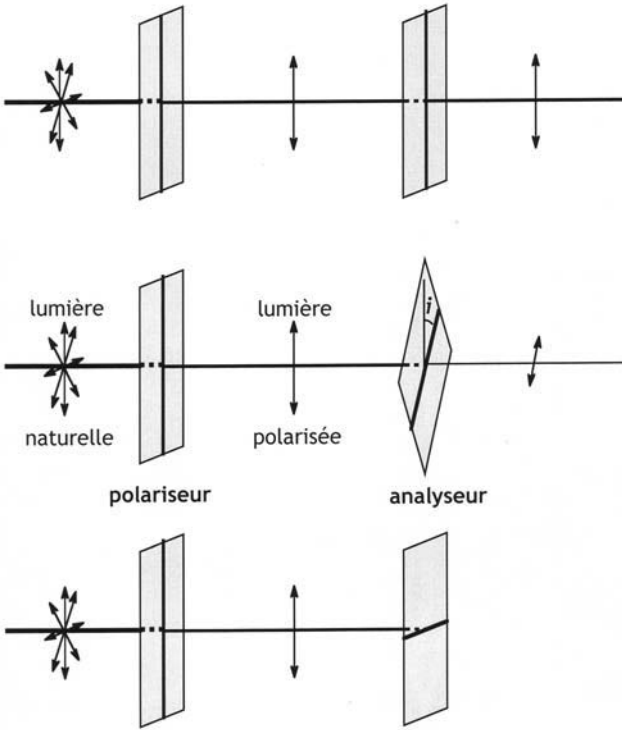


Figure 3.13. Un polariseur sélectionne dans une lumière naturelle les composantes du champ électrique de l'onde dans une certaine direction ; l'onde est alors polarisée (voir la figure 3.12 d). Si l'on fait passer une lumière polarisée à travers un autre polariseur, appelé pour la circonstance analyseur, elle n'est pas atténuée si la direction de polarisation de cet analyseur est parallèle à son propre plan de polarisation (en haut), et elle est complètement éteinte si cette direction est perpendiculaire (en bas). Dans d'autres directions, l'intensité de la lumière est atténuée par le facteur $\cos^2 i$, i étant l'angle entre les plans de polarisation du polariseur et de l'analyseur (au milieu).

« Il semble qu'on est obligé de conclure que les ondes de lumière, pour avoir passé le premier cristal, acquièrent une certaine forme ou disposition, par laquelle en rencontrant le tissu du second cristal, dans une certaine position, elles puissent éliminer les deux différentes matières qui servent aux deux espèces de réfraction ; et en rencontrant ce second cristal dans une autre position, elles ne puissent éliminer que l'une de ces matières. Mais pour dire comment cela se fait, je n'ai rien trouvé jusqu'ici qui me satisfasse. »

Sans vraiment comprendre ces propriétés, on les utilisait dans des buts pratiques. C'est ainsi que l'astronome et physicien Alexis Marie de Rochon a construit en 1777 un « double prisme » (prisme composite) de quartz, représenté figure 3.17, qui dédouble un rayon incident en deux rayons entre lesquels on peut choisir l'angle par construction. Rochon utilisait ce double prisme monté à l'intérieur d'une lunette pour mesurer des distances angulaires, par exemple la distance entre deux étoiles ou le diamètre apparent du Soleil, de la Lune ou d'une planète (figure 3.18)²¹.

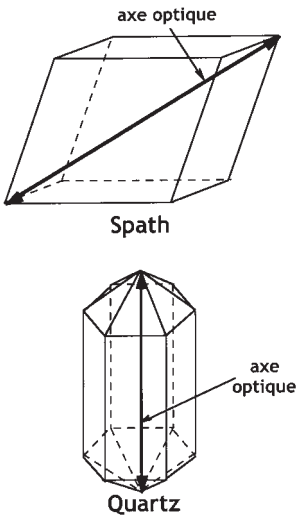


Figure 3.14. Cristaux de spath et de quartz. Les propriétés optiques très intéressantes de ces cristaux les ont fait beaucoup utiliser en optique jusqu'au milieu du xx^e siècle. Ces propriétés sont en partie différentes, mais présentent dans les deux cas une symétrie autour de l'axe optique indiqué sur la figure.

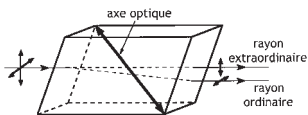


Figure 3.15. Le spath d'Islande. Comme tout cristal biréfringent, la spath décompose un rayon de lumière naturelle en deux rayons polarisés perpendiculairement l'un à l'autre.

Malus et la découverte de la polarisation

C'est un français, Étienne-Louis Malus (figure 3.16 ; encadré 3.5), qui découvre en 1808 la polarisation par réflexion²². Observant le Soleil couchant par réflexion sur les fenêtres du palais du Luxembourg à travers un cristal de spath d'Islande, il remarque que la lumière s'affaiblit pour certaines orientations du cristal, alors qu'il n'en est rien pour la lumière directe du Soleil. Cette découverte est reportée comme suit par Arago, en 1824²³ :

« Ce physicien, qu'une mort prématurée a si tôt enlevé aux sciences dont il était l'espoir et à ses nombreux amis, m'a souvent raconté que ce fut en décomposant par hasard, vers la fin de l'année 1808, à l'aide d'un rhomboïde de carbonate de chaux, la lumière du soleil couchant, réfléchi sur les vitres des fenêtres du Luxembourg, qu'il reconnut pour la première fois la différence d'intensité des deux images.[...] Malus [...] devint ainsi le créateur d'une nouvelle branche de l'optique. [Arago ajoute en note :] On s'est trompé en annonçant qu'il avait vu ainsi une des images disparaître, la polarisation sur les vitres, au moment de l'expérience, n'était que partielle. »

Ensuite, Malus observe le Soleil par réflexion sur la surface d'une mare, avec un résultat semblable. Il poursuit ses recherches avec des lames de verre, et constate que la lumière réfléchie par une lame puis observée à travers un spath d'orientation appropriée peut être supprimée complètement pour un certain angle d'incidence, nommé plus tard angle de Brewster du nom du physicien écossais David Brewster. Pour la réflexion sur le verre, le rayon incident et le rayon réfléchi font alors un angle de $35^{\circ}25'$ avec la face d'entrée.

Malus qualifie de *polarisée* la lumière réfléchie par les vitres ou par la surface de l'eau²⁵. Partisan quelque peu sceptique de la théorie corpusculaire, il suppose que les corpuscules (on dit alors molécules) de lumière de la théorie de Newton présentent une certaine asymétrie, et il imagine que ces corpuscules sont triés selon leur orientation lorsqu'ils sont réfléchis par une surface vitreuse.

L'apport d'Arago

Arago s'intéresse vivement à la découverte de Malus, avec lequel il se lie d'amitié. Il défend ses travaux devant l'Académie des sciences. Un poste devenant vacant en 1810,

Encadré 3.5. Etienne Louis Malus²⁴

Malus est né en 1775 dans une famille fortunée. Il fait ses études d'abord à la maison, puis à l'École royale du génie à Mézières, où son professeur, qui n'est autre que Gaspard Monge, le remarque. Il fait ensuite une carrière militaire, interrompue par un séjour en tant qu'élève à l'École polytechnique juste créée. Il fait partie de l'expédition scientifique de Bonaparte en Egypte, où il est un des douze « membres mathématiciens » de l'Institut du Caire. Ses travaux sur la lumière, commencés avant 1803, sont dispersés dans diverses publications. Malus est élu à la première classe de l'Institut en 1810, et en dépit de la guerre qui règne entre l'Angleterre et la France, la Royal Society de Londres lui décerne la médaille Rumford. Il meurt de tuberculose à Paris, à l'âge de 37 ans.



Figure 3.16. Étienne-Louis Malus (1775-1812).

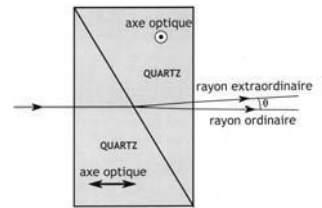


Figure 3.17. Le double prisme de Rochon. Il est formé d'un prisme de quartz taillé perpendiculairement à l'axe optique, qui ne produit pas de double réfraction, et d'un autre prisme de quartz taillé parallèlement à l'axe optique, qui produit une double réfraction. Les deux rayons ordinaire et extraordinaire ainsi produits sont polarisés perpendiculairement l'un à l'autre et séparés de l'angle θ , que l'on peut choisir dans certaines limites en construisant de façon adéquate l'angle des deux prismes. Pour des prismes de 30° , il est de 20 minutes de degré.

il le pousse à s'y présenter et Malus est élu. Il décèdera malheureusement deux ans après. Arago et son collègue Jean-Baptiste Biot deviennent rapidement des spécialistes de la polarisation, sans grands rivaux à l'étranger sauf Brewster en Écosse. C'est d'ailleurs Arago que l'on sollicitera pour écrire l'article sur la polarisation dans l'*Encyclopedia Britannica*, article traduit en anglais par Thomas Young et dont l'original français est reproduit in extenso dans les *Œuvres complètes*²⁶. Cet article, qui date de 1824, est un modèle de clarté, et montre que l'essentiel de nos connaissances sur la polarisation de la lumière est alors déjà acquis. Arago en fait un historique, prenant soin de préciser la contribution de chacun des acteurs. On y voit que, même si celles de Malus et de Fresnel sont prépondérantes, la sienne propre est très importante.

La grande découverte d'Arago, qui date de 1811, est celle de la polarisation chromatique et de la polarisation rotatoire²⁷. La polarisation chromatique s'observe en plaçant entre un polariseur et un analyseur croisés une lame d'un cristal biréfringent, par exemple une lame de mica : alors que la lumière serait complètement éteinte en l'absence de cette lame, celle-ci paraît plus ou moins vivement

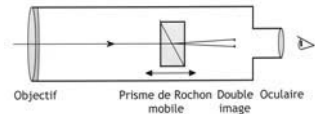


Figure 3.18. Principe de la lunette de Rochon.

Un double prisme de Rochon (figure 3.17) est placé dans une lunette, et donne une double image d'un objet astronomique, que l'on observe avec l'oculaire. En déplaçant le prisme longitudinalement, on écarte plus ou moins les deux images, qui restent au point. Si l'on veut par exemple mesurer le diamètre apparent d'une planète, on règle le prisme de façon à ce qu'un bord d'une des images coïncide avec le bord opposé de l'autre image. La mesure se fait, après un étalonnage préalable, en repérant la position du prisme sur une règle graduée.

colorée^h. Nous ne parlerons pas davantage de ce phénomène en général, mais seulement du cas particulier où la lame est taillée dans un cristal de quartz perpendiculairement à l'axe optique : on parle alors de polarisation rotatoire chromatique. Il est illustré figure 3.19 et son explication est donnée dans l'encadré 3.6 et la figure 3.20.

La genèse de la découverte d'Arago est décrite dans son article pour l'*Encyclopedia Britannica* et dans un autre texte²⁸. Son montage définitif est le suivant : la lumière du Soleil, provenant sans doute d'un héliostat, est envoyée sur une glace sous l'incidence de Brewster. La lumière réfléchie est alors totalement polarisée. Après réflexion normale sur un miroir plan, ce qui rend le montage plus commode sans modifier l'état de polarisation, la lumière entre dans une lunette qui produit une image du Soleil, que l'on peut observer grâce à un oculaire. On dispose sur le trajet de la lumière, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objectif de cette lunette, une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe optique (voir figure 3.14) ; cette lame ne présente alors pas de biréfringence. La lunette contient un cristal biréfringent (en fait un prisme de Rochon, voir la figure 3.16), qui dédouble l'image.

La lame de quartz a la propriété, découverte à cette occasion, de faire tourner le plan de polarisation de la lumière qui la traverse : c'est la polarisation rotatoire. Si l'on observait en lumière monochromatique, par exemple en plaçant devant la lunette un filtre coloré, on verrait les deux images du Soleil avec des intensités inégales selon l'angle dont a tourné le plan de polarisation : par exemple, une de ces images serait éteinte si l'angle était de 90°. Mais Arago observe en lumière blanche, sans filtre. Les deux images sont alors colorées de couleurs complémentaires, comme l'expliquent l'encadré 3.6 et la figure 3.20 : c'est la polarisation chromatique. Si la lumière incidente n'est pas polarisée, les deux images sont de la même couleur que cette lumière, donc sensiblement blanches dans le cas du Soleil. Si elle n'est que partiellement polarisée, les deux couleurs complémentaires sont lavées de blanc.

^h Babinet en dit en 1840 (CRAS 11, p. 618-620) : « Ce fut en observant les couleurs que présentent les lames de mica éclairées par la lumière d'un ciel serein, que M. Arago découvrit la polarisation chromatique. » En effet, la lumière du ciel est polarisée, mais il faut interposer un analyseur entre la lame de mica et l'œil pour constater le phénomène.

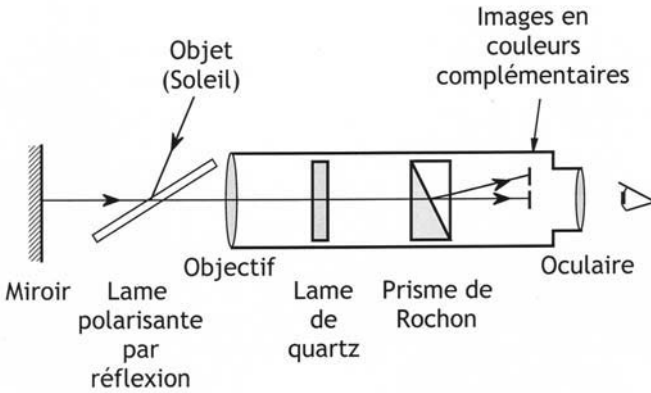


Figure 3.19. Montage d'Arago pour observer la polarisation rotatoire chromatique. Explications dans le texte.

Encadré 3.6. La polarisation rotatoire chromatique (figure 3.20)

Une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe optique n'est pas biréfringente, mais a la propriété de faire tourner le plan de polarisation de la lumière qui la traverse perpendiculairement d'un angle α qui dépend de l'épaisseur e de la lame et de la longueur d'onde λ de la lumière (cette propriété est camouflée par la biréfringence si la lame est taillée selon d'autres orientations). Cet angle de rotation obéit à la loi de Biot : $\alpha(\lambda)$ est proportionnel à e/λ^2 . Ici on a représenté schématiquement la rotation des composantes rouge, jaune et violette de la lumière, produite par une lame d'épaisseur 3,75 mm. Si la lumière incidente est entièrement polarisée, ces composantes le sont aussi. Un analyseur placé derrière la lame laisse passer entièrement la couleur dont la direction de polarisation est parallèle à celle de l'analyseur, mais affaiblit les autres, si bien que la lumière transmise est colorée. En position "analyseur 1" la lumière transmise est rouge-orangé, tandis qu'en position "analyseur 2" elle est bleu-vert. Ces deux couleurs sont complémentaires si les deux positions de l'analyseur sont perpendiculaires l'une à l'autre. C'est ce qui est réalisé si l'analyseur est un double prisme de Rochon (figure 3.16), qui produit deux images fortement décalées, polarisées perpendiculairement l'une à l'autre¹ : les deux images ont donc des couleurs complémentaires, que l'on peut changer en tournant le cristal.

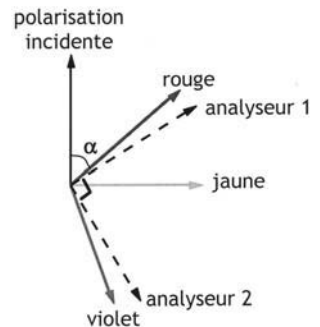


Figure 3.20. Explication de la polarisation rotatoire chromatique (voir l'encadré 3.6).

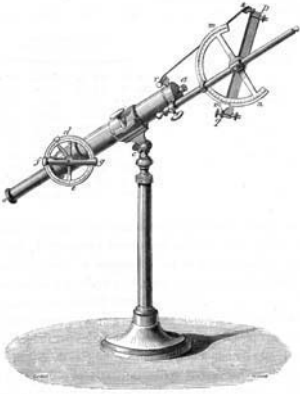


Figure 3.21. Gravure du polariscope-polarimètre d'Arago (1811). Le polariscope proprement dit se compose d'une lunette de Rochon (voir la figure 3.16) à l'intérieur de laquelle on a ajouté une lame de quartz. Si le rayonnement est polarisé, les deux images de l'objet sont colorées. Pour le transformer en polarimètre, on place devant comme ici une pile de lames de verre inclinable (en haut à droite), qui permet de compenser la polarisation du rayonnement incident : son inclinaison donne alors le taux de polarisation de ce rayonnement.



Figure 3.22. Le prototype du polariscope-polarimètre d'Arago (1811). Le constructeur de cet instrument est inconnu. Ici, la pile de lames de verre est remplacée par une simple glace.

Arago a ainsi réalisé un dispositif très sensible capable de détecter la polarisation d'une lumière, pourvu qu'elle soit émise dans une gamme étendue de longueurs d'onde ; il utilise une lunette de Rochonⁱ (figure 3.17), dans ou devant laquelle il a placé une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe optique, et appelle cet instrument *polariscope* (figure 3.21 et figure 3.22). Il suffit de braquer ce polariscope vers un objet, éventuellement diaphragmé de façon à ce que les deux images ne se superposent pas s'il est trop étendu, pour voir si la lumière qui en parvient est polarisée ou non.

Plus tard, Arago va mesurer le taux de polarisation des objets qui ne sont que partiellement polarisés : ce taux est la fraction de leur lumière qui est polarisée. À cet effet, il place devant son polariscope une pile de glaces, formée de plusieurs lames de verre parallèles séparées les unes des autres par de minces cales (Arago l'appelle *pile de plaques*). Il incline cette pile de façon repérable grâce à un cercle gradué, transformant ainsi son polariscope en polarimètre. Fresnel, qui a étudié les propriétés des piles de glaces, a en effet montré qu'une pile de glaces polarise plus ou moins la lumière incidente selon son inclinaison : ceci permet d'égaliser les intensités des composantes polarisées parallèlement et perpendiculairement à la pile. Les deux images fournies par l'instrument deviennent alors blanches. En repérant l'inclinaison de la pile, on peut alors déterminer le taux de polarisation de la lumière. Dans une variante, l'inclinaison de la pile de glaces est maintenue fixe et on place devant une lame de quartz. On tourne le tout autour de l'axe optique jusqu'à observer la disparition des couleurs : on peut déduire le taux de polarisation de l'angle de rotation que l'on a atteint²⁹. Jusqu'à la fin de sa vie, Arago a cherché à améliorer son polarimètre, qui a d'ailleurs été commercialisé : par exemple, il a fait faire par Laugier en 1850 de nouvelles mesures de

ⁱ Le double prisme de Rochon sera souvent remplacé plus tard par le prisme inventé en 1828 par l'écosais William Nicol, un polariseur formé d'un cristal de spath coupé selon un certain angle et recollé au baume du Canada.

^j L'astronome Alexis Marie de Rochon (1741-1817, élu à l'Académie des Sciences en 1795) avait réalisé cette lunette, qui donne d'un objet deux images de séparation variable connue, pour mesurer le diamètre apparent d'objets astronomiques ou la distance angulaire séparant deux étoiles.

la dépolarisation par des piles de glace, en vue de mieux graduer le polarimètre³⁰.

Il n'est pas surprenant que muni de ces instruments à la fois performants et simples d'emploi, Arago ait fait des découvertes importantes, et aussi qu'il ait adapté ces instruments à différentes observations : nous en verrons des exemples dans les chapitres suivants. Son polarimètre est à la base de différents instruments comme le colorigrade de Biot qui permet un repérage des couleurs, et les cyanomètres de Biot et Arago (figure 3.23), utilisés au repérage des teinte du bleu du ciel.

La polarisation a continué à susciter beaucoup d'intérêt pendant tout le XIX^e siècle. Les cabinets de physique contiennent de nombreux instruments comme l'appareil de Biot et Savart (figure 3.24), ou l'appareil de Nörrenberg (figure 3.26), qui sont destinés soit à étudier la polarisation, soit à l'utiliser pour différentes applications pratiques. Biot a découvert la polarisation rotatoire produite par certains liquides, initialement l'essence de térébenthine³¹, ce qui a permis de construire des saccharimètres reposant sur le pouvoir rotatoire des solutions de sucre ; la polarisation rotatoire chromatique a été, et est toujours, utilisée pour la reconnaissance de minerais³².

Arago et Fresnel

Les débuts de Fresnel

Si les idées de Thomas Young sont l'objet des sarcasmes de ses contemporains, elles n'en sont pas moins lancées. Mais c'est à un jeune ingénieur français des Ponts et Chaussées, Augustin Fresnel (figure 3.25 ; encadré 3.7), que reviendra l'honneur de redécouvrir en grande partie ce qu'avait trouvé Young et d'échafauder la première théorie complète et satisfaisante de la lumière. Nous verrons qu'Arago a joué dans cette élaboration un rôle fort important.

Étudiant en amateur les théories sur la nature de la lumière, Fresnel acquiert la conviction que la lumière ne peut être faite de corpuscules matériels comme l'avait proposé Newton, mais qu'il faut retourner aux ondes dont Huygens s'était fait le promoteur. Les faibles connaissances de Fresnel en physique et le fait qu'il se trouve hors du milieu scientifique, qui à l'époque est entièrement en faveur de Newton, jouent à son avantage car il n'a pas d'idées préconçues.

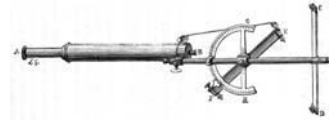


Figure 3.23. Le cyanomètre de Biot et Arago (1815). Il se compose d'un polarimètre (voir figure 3.21) devant lequel on place un écran de papier blanc. En inclinant la pile de glaces du polarimètre, on polarise plus ou moins la lumière issue de l'écran et on voit donc une couleur dans la lunette. On repère l'inclinaison pour laquelle cette couleur est analogue au bleu du ciel observé dans la même direction, ce qui fournit une indication qualitative de cette couleur.



Figure 3.24. Appareil de Biot et Savart (milieu du XIX^e siècle). Destiné à l'étude de la polarisation, cet appareil construit par Soleil fils (Henri Soleil, décédé en 1872), est un simple tube qui comporte à une extrémité une glace de verre noir pour polariser la lumière par réflexion, et à l'autre une pile de glaces pour l'analyser ; ces éléments sont orientables dans toutes les directions.



Figure 3.25. Augustin Fresnel (1788-1827).

Encadré 3.7. Augustin Fresnel³⁴

Fresnel est né à Broglie, dans l'Eure, dans une famille de bonne et ancienne bourgeoisie. Son oncle, Léonor Mérimée, est un peintre de talent qui a longtemps dirigé l'École des beaux-arts de Paris, et dont le fils est l'écrivain et archéologue Prosper Mérimée, un des familiers de Napoléon III. Fresnel enfant est rebelle à l'enseignement classique, mais son sens de l'observation et de l'expérience est très développé. À l'École centrale de Caen, il se révèle excellent en mathématiques ; il est admis en 1804, âgé de 16 ans et demi, à l'École polytechnique où son frère Louis l'a précédé d'un an et où son autre frère Léonor, un des éditeurs de ses *Œuvres complètes*, entrera quatre années plus tard. L'enseignement des mathématiques est remarquable, mais celui de la physique à peu près nul et Fresnel sort de l'École avec des notions rudimentaires dans cette discipline. Il entre en 1806 à l'École des ponts et chaussées, puis, ayant obtenu le titre d'ingénieur ordinaire, est employé à construire des routes en Vendée, puis à Nyons dans la Drôme. Pour se distraire, il travaille à quelques problèmes de chimie, puis de physique, et commence en 1814 à s'intéresser à la lumière. Ses recherches en optique lui valent d'être élu à l'Académie des sciences en 1823, puis d'être inscrit en 1825 parmi les associés de la Société Royale de Londres. Attaché au service des phares en 1819, il révolutionne l'éclairage des côtes grâce à ses lentilles à échelons. De santé chancelante dès 1823, il meurt de tuberculose à Paris en 1827, alors que son ami Arago vient de lui remettre la médaille Rumford de la Société royale de Londres.

En 1814, il vient juste d'entendre parler de la polarisation de la lumière, pourtant découverte depuis déjà six années, et ne sait pas de quoi il s'agit. Mais ses progrès seront rapides.

En avril 1815, s'étant déclaré ouvertement contre Napoléon à son retour de l'Île d'Elbe, Fresnel est assigné à résidence dans la propriété familiale du petit village de Mathieu, près de Caen. Il peut alors travailler à plein temps à l'optique physique et entre en relation avec Arago, qui a alors acquis une très grande réputation, notamment grâce à ses travaux sur la polarisation.

Le 23 septembre 1815, il lui envoie de Mathieu une lettre dont voici un extrait³⁵ :

« Monsieur,

« Je crois avoir trouvé l'explication et la loi des franges colorées qu'on remarque dans les ombres des corps éclairés par un point lumineux. Les résultats que me donne le calcul sont confirmés par l'observation. Mais je n'ai pu mettre encore dans ces observations le degré d'exactitude nécessaire pour être parfaitement sûr de la justesse de ma formule. Il me faudrait pour cela des instruments que je ne puis me procurer qu'à Paris. Avant de faire cette dépense, je désirerais savoir si elle n'est pas inutile, et si l'on n'a point déjà déterminé la loi de la diffraction par des expériences suffisamment exactes. »

Le 26 octobre 1815, Fresnel écrit à Arago, toujours de Mathieu, une autre lettre qui mérite d'être citée en grande partie³⁶ :

« Monsieur,

« Quelques jours après vous avoir annoncé que je croyais avoir trouvé l'explication de la diffraction, j'ai construit un micromètre, au moyen duquel je suis parvenu à faire des observations assez exactes pour ne plus douter de la justesse des formules auxquelles m'avait conduit la théorie des vibrations.

« Une expérience fort simple m'avait prouvé que les rayons de la lumière pouvaient agir les uns sur les autres, s'affaiblir et s'éteindre, même presque complètement, lorsque leurs vibrations se contrariaient : s'ajouter l'une à l'autre et se fortifier mutuellement, au contraire, lorsqu'ils vibraient d'accord. C'est sur ce principe que j'ai basé mon explication de la diffraction.

« En étendant cette théorie des ondulations et de l'influence qu'exercent les rayons les uns sur les autres à la réflexion et à la réfraction, j'ai trouvé la raison des lois auxquelles la marche de la lumière est assujettie dans ces deux phénomènes.

« J'ai exposé cette théorie et les expériences qui m'y ont conduit dans un Mémoire que j'ai envoyé à mon oncle [Jean François Léonor Mérimée], le 16 de ce mois, pour qu'il le présentât à M. le Secrétaire perpétuel de la première classe de l'Institut. Vous l'avez peut-être déjà parcouru. Je désirerais bien savoir quel jugement vous en portez. Votre suffrage est celui que j'ambitionne le plus. [Fresnel annonce ensuite qu'il a expliqué par sa théorie les anneaux de Newton et même les réseaux de diffraction.]



Figure 3.26. Appareil de Nörrenberg, inventé en 1839. L'instrument photographié ici a été construit avant 1849 par Jean-Baptiste François Soleil. Une lumière est réfléchiée vers le bas par la glace rectangulaire sous l'incidence de Brewster, et est donc entièrement polarisée. Après réflexion vers le haut par le miroir horizontal, elle traverse un échantillon placé sur l'anneau médian, puis arrive sur un analyseur de polarisation. Si l'échantillon présente de la polarisation rotatoire chromatique, on observe une couleur avec l'oculaire situé en haut. C'est l'ancêtre du microscope polarisant utilisé en minéralogie.

« Ainsi la réflexion, la réfraction, tous les cas de la diffraction, les anneaux colorés dans les incidences obliques comme dans les incidences perpendiculaires, le rapport remarquable entre les épaisseurs de l'air et de l'eau qui produisent les mêmes anneaux, tous ces phénomènes, qui nécessitaient autant d'hypothèses particulières dans le système de Newton, sont réunis et expliqués par la même théorie des vibrations et de l'influence des rayons les uns sur les autres. Il est probable qu'elle doit conduire aussi à une explication satisfaisante de la double réfraction et de la polarisation. C'est actuellement l'objet de mes recherches.[...] »

Arago lui répond le 8 novembre :

« Monsieur,

« J'ai été chargé par l'Institut de l'examen de votre mémoire sur la diffraction de la lumière ; je l'ai étudié avec soin, et j'y ai trouvé un grand nombre d'expériences intéressantes, dont quelques-unes avaient déjà été faites par le docteur Thomas Young qui, en général, envisage ce phénomène d'une manière assez analogue à celle que vous avez adoptée.[...] »

Le mémoire dont il s'agit est tout à fait remarquable, et l'on conçoit qu'Arago soit très impressionné³⁷. Il commence par une critique approfondie de Newton. Fresnel refait ensuite la première expérience d'interférences de Young, qui consiste à observer l'ombre d'un ruban ou d'un fil éclairé par une source ponctuelle : on y voit sur les bords des franges de diffraction et dans l'ombre elle-même des franges d'interférence. Il remarque :

« Puisque en interceptant la lumière d'un côté du fil on fait disparaître les franges intérieures, le concours des rayons qui arrivent des deux côtés est donc nécessaire à leur production.[...] »

Puis Fresnel donne une interprétation inexacte de ces interférences, rectifiée en marge par une note manuscrite qui indique correctement :

« On conçoit aisément, en effet, que deux ondulations qui se croisent sous un petit angle doivent se contrarier et s'affaiblir lorsque les nœuds dilatés [régions d'amplitude maximale] des unes répondent aux nœuds condensés [régions d'amplitude minimale] ; n'oublions pas que les ondes lumineuses étaient alors considérées comme longitudinales] des autres, et se fortifier mutuellement, au contraire, lorsque leurs mouvements sont en harmonie. »

En faisant des mesures à différentes distances du fil, il remarque

« que la même frange ne se propage pas en ligne droite, mais suivant une hyperbole, dont les foyers sont le point lumineux et un des bords du fil, pour les franges extérieures ».

Ceci est illustré par une célèbre figure reproduite ici figure 3.27. C'est ce qui a le plus impressionné les commissaires qui ont examiné le mémoire, Louis Poinsot et Arago. Ils en disent³⁸ :

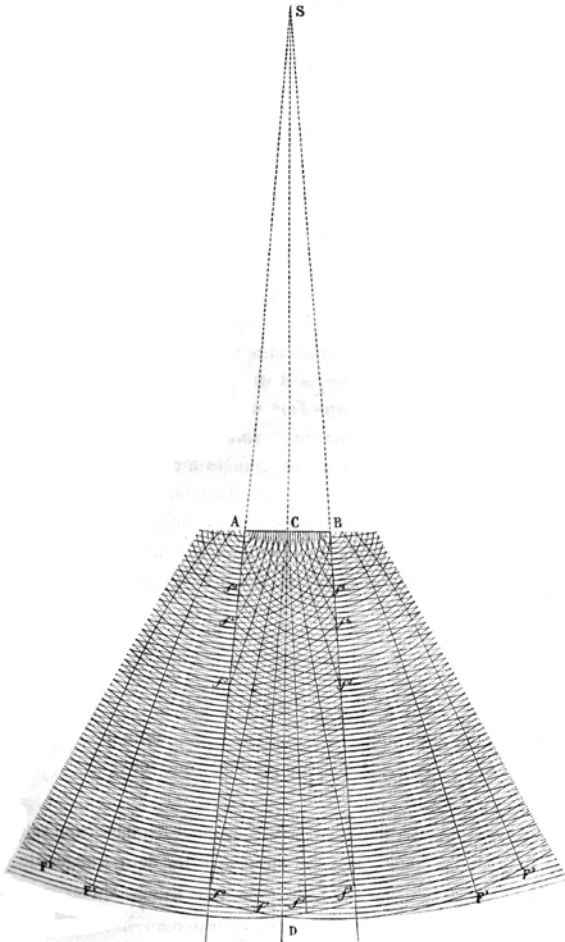


Figure 3.27. Explication par Fresnel des franges de diffraction et d'interférence créées par les bords d'un ruban ou d'un fil de section AB éclairé par une source ponctuelle S³⁹. La figure est tracée dans une section plane perpendiculaire au fil. Remarquer les ondes à section circulaire centrées sur A et B, et les lieux des franges d'interférence f ou F. Fresnel constatera expérimentalement plus tard que les « rayons efficaces », c'est à dire les ondes diffractées par les bords de l'obstacle, ne sont pas exactement centrés en A et B, mais en des points situés légèrement à l'extérieur, et en donnera la théorie exacte en 1818 : voir la figure 3.28.

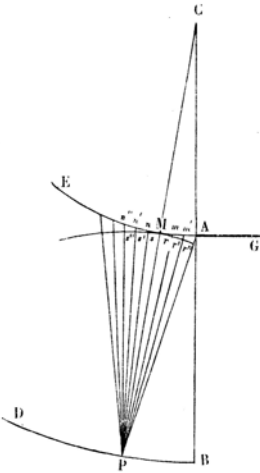


Figure 3.28. Schéma du mécanisme intégral⁴⁰ par lequel Fresnel explique les franges de diffraction au bord A de l'ombre d'un obstacle AG éclairé par une source ponctuelle C. D'après le principe d'Huygens-Fresnel, la lumière en un point P est la résultante de toutes les ondes élémentaires qui parviennent des différents points de la surface d'onde EMA centrée sur C. Fresnel obtient son intensité en intégrant toutes ces ondes, compte tenu de leur phase qui varie avec la position comme on peut le voir en considérant les trajets optiques ns , $n's'$, etc. et mr , $m'r'$, etc.

« Le fait découvert par M. Fresnel, de la propagation des bandes dans des hyperboles, nous semble un des plus curieux résultats de l'optique.[...] Nous ignorons comment ce mouvement singulier pourrait se concilier avec l'hypothèse de l'émission. Les circonstances les plus simples de la formation des bandes intérieures sont inexplicables, ou du moins inexplicables dans la théorie ordinaire.[...] Si nous ajoutons qu'il n'est aucune expérience de diffraction connue jusqu'à présent qui ne puisse être, nous ne dirons pas expliquée, mais même calculée, on ne pourra s'empêcher d'avouer, quelque opinion qu'on ait d'ailleurs sur le fond de la question, que l'hypothèse de M. Fresnel mérite d'être suivie et de fixer l'attention des physiciens. »

Puis Fresnel explique la réflexion et la réfraction de la même façon que Huygens, en appliquant son principe que nous appelons quelquefois aujourd'hui le principe de Fresnel, car il l'a exprimé en 1818 sous une forme plus claire que Huygens³⁹ :

« Les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points sont égales à la somme de tous les mouvements élémentaires qu'y enverrait au même instant, en agissant isolément, chaque petite partie de cette onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures. »

La figure 3.28 illustre bien le principe de Huygens-Fresnel.

Fresnel écrit ensuite, toujours dans son mémoire de 1815 :

« Cette explication de la réflexion n'oblige pas d'admettre [...] que la surface des corps polis est absolument sans aspérités ; il suffit de supposer que ces aspérités sont très-petites par rapport aux longueurs d'ondulation.[...] Avec ces considérations, il me paraît facile d'expliquer les images colorées que réfléchissent les surfaces rayées, phénomène curieux dont M. Arago a bien voulu me donner la description. »

On trouve ici la première mention de ce que la qualité optique et le poli d'un miroir doivent être de l'ordre d'une petite fraction de la longueur d'onde pour donner de bonnes images, point que Fresnel développera plus tard, et l'annonce de l'explication de la diffraction par un réseau

avec ses différents ordres^k, dont Fresnel va donner un exposé détaillé dans un complément⁴¹ dont voici un court extrait :

« Si l'on grave sur une surface polie des raies parallèles à égales distances les unes des autres [...], elle devra réfléchir, avec l'image ordinaire de l'objet lumineux, une autre image colorée, et même plusieurs, si la surface rayée a une étendue suffisante. Les couleurs seront rangées dans le même ordre que le spectre solaire ou les anneaux colorés ; le violet sera le plus rapproché de l'image incolore, et le rouge le plus éloigné. »

Il s'agit donc d'un réseau par réflexion, dont Fresnel démontre ensuite la formule fondamentale. Plus loin, l'étude de la transmission de la lumière par un tissu très fin lui montre que ce tissu est un réseau par transmission. Fraunhofer a retrouvé la formule des réseaux par l'observation plusieurs années après. Fresnel étudie ensuite les anneaux de Newton par réflexion et par transmission, mais *« n'a pas encore trouvé la raison »* du cercle central noir, qui est dû au changement de phase correspondant à une demi-longueur d'onde lors de la réflexion verre-air, déjà remarqué par Young. Il écrit dans une lettre à Arago expédiée de Rennes le 3 décembre 1815 ⁴² :

« Pour compléter cette théorie des vibrations, il serait aussi bien nécessaire d'expliquer comment les rayons changent d'une demi-ondulation en éprouvant l'inflexion ; je serais assez porté à croire que dans l'inflexion et la réflexion ce sont les molécules mêmes des corps qui reproduisent les mouvements vibratoires imprimés par les rayons incidents. Cette manière d'envisager le phénomène conduirait peut-être à son explication. »

Le second mémoire promis dans la lettre du 26 octobre, qui est en grande partie une refonte du premier, sera en fait publié en plusieurs articles dans les *Annales de chimie et de physique*. Fresnel y fait pour la première fois référence

^k On attribue souvent à Joseph von Fraunhofer l'invention du réseau de diffraction au tout début du XIX^e siècle ; mais ses propriétés ont été décrites pour la première fois à la fin du XVIII^e siècle par l'astronome américain David Rittenhouse (Cope T.D. 1932, *Journal of the Franklin Institute* 214, p. 99-104), et nous avons vu que Young le mentionne et l'explique aussi dès 1802. Fresnel, qui citait toujours ses sources, ignorait visiblement ces travaux.

à Young¹ : en effet il ignorait jusque-là les travaux de ce dernier, puisqu'il demande à Arago deux semaines après de lui envoyer des informations sur ces travaux car il ne lit pas l'anglais⁴³.

« Dans le Mémoire que j'ai présenté à l'Institut, j'avais expliqué par la même théorie des accords et des discordances des vibrations lumineuses les images colorées que réfléchissent les surfaces rayées et celles qu'on aperçoit à travers un tissu très-fin, et j'en avais déduit les formules qui représentent la loi de ces phénomènes. Mais ayant appris de M. Arago que le docteur Young avait donné depuis longtemps les mêmes explications et les mêmes formules, je n'en ferai pas mention ici. »

Fresnel et Arago à Paris

Après la seconde abdication de Napoléon, Arago écrit à Marie Riche, baron de Prony (l'inventeur du frein qui porte son nom), directeur de l'École des ponts et chaussées qui est donc le supérieur hiérarchique de Fresnel, maintenant réintégré dans le corps des ponts et chaussées⁴⁴ : par cette lettre (figure 3.29), il lui demande de laisser Fresnel venir à l'Observatoire de Paris pour lui montrer ses expériences *« très-remarquables par leur nouveauté, je dirais même leur hardiesse, [qui] ne pourront être admises qu'après un sérieux examen »*.

Cette autorisation est accordée, et c'est le début d'une longue collaboration qui continuera de façon intermittente jusqu'en 1819 : Fresnel, qui a repris son métier

¹ Young, mis au courant des travaux de Fresnel par Arago, a commencé par trouver qu'il n'y avait rien de nouveau. Mais il a reconnu plus tard le génie de Fresnel, comme on peut le voir dans la correspondance entre Arago, Fresnel et Young publiée dans les *Cœuvres complètes* de Fresnel. Cette correspondance est généralement amicale, mais chacun tient visiblement à faire respecter sa priorité. Une lettre de Young du 18 juin 1827 annonce à Fresnel que la Royal Society lui a attribué la médaille Rumford, donnée tous les deux ans à l'auteur de la découverte la plus importante relative à la chaleur et à la lumière, pour ses travaux sur l'application de la théorie ondulatoire à la polarisation. Arago annonce de son côté le 6 août 1827 à Young qu'il est nommé l'un des huit associés étrangers de l'Académie de sciences, et lui annonce la mort de Fresnel *« qui était déjà à moitié éteint lorsque je lui remis vos médailles »*.

Paris le 19 Décembre 1819.

Monsieur et cher confrère.

J'ai été chargé, par l'Institut, d'un des derniers séjours, d'examiner
 un très beau mémoire de M^r Fresnel, l'un de nos anciens élèves. Ses
 expériences qu'il rapporte, très remarquables par leur nouveauté, je dois
 même par leur hardiesse, ne pouvoient être admises qu'après un sévère
 examen. Il seroit grandement à désirer que l'auteur put venir
 passer quelques jours à Paris où je m'empresserois de lui fournir
 les moyens de compléter pourrément ses recherches. Ne-
 puis-je, sous ce rapport, Monsieur, qu'il seroit possible d'obtenir de son
 Excellence le Directeur Général, à cette époque de l'année où les
 travaux doivent avoir peu d'activité, un conseil de quelque
 secours? Je m'adresse à vous avec confiance, persuadé que
 vous portez à M^r Fresnel tout l'intérêt que doit vous inspirer son
 double titre de physicien très habile et d'Ingénieur des ports et chaussées.

P. S. j'oublierois de vous dire que
 M^r Fresnel est actuellement à Bourges.

Votre très humble et très obéissant serviteur
 F. Arago

ARCHIVES
 DE
 L'ACADEMIE
 DES SCIENCES
 INSTITUT DE FRANCE

Figure 3.29. Lettre d'Arago à Prony, par laquelle il lui demande de laisser venir Fresnel travailler avec lui à l'Observatoire.



Figure 3.30. Banc d'optique probablement utilisé par Fresnel. Construit par Soleil sans doute vers 1819, en acajou et en laiton, il était destiné à l'étude de la diffraction et des interférences. Le tiroir contient de nombreux accessoires, dont des miroirs de Fresnel.

d'ingénieur, peut néanmoins venir assez fréquemment à Paris, où il sera d'ailleurs affecté en 1818. Arago lui fait installer un laboratoire à l'Observatoire, où l'on trouve un banc d'optique que Fresnel a probablement utilisé (figure 3.30).

En 1819, Fresnel est nommé au Service des phares, et continue à travailler avec Arago dans ce nouveau domaine : nous en reparlerons plus loin. Bien qu'Arago soit célèbre, il n'a que deux ans de plus que Fresnel et ils s'entendent très bien ; esprits indépendants l'un et l'autre, ils ne sont pas paralysés par le poids des traditions. Fresnel fait à la fois des expériences et de la théorie et Arago, expérimentateur habile mais peu porté sur le travail théorique, participe à ses expériences. Par exemple, Fresnel écrit en février 1816 à son frère cadet Léonor, inspecteur général des Ponts et Chaussées :

« J'ai sujet d'être satisfait relativement à la vérification qu'Arago a fait de ma théorie.[...] Il a imaginé dernièrement une nouvelle expérience à laquelle je n'avais pas pensé et dont le résultat est encore une confirmation de ma théorie. Au lieu d'intercepter la lumière sur un des bords du fil avec un corps opaque, il y a placé un verre et les franges intérieures ont disparu. Nous sommes rentrés chez moi pour en chercher la raison : je lui ai fait voir que cela venait du retard que la lumière avait éprouvé en traversant le verre d'un côté, en sorte que les franges du 1^{er}, 2^e, 3^e et 4^e ordres, les seules que l'on puisse bien voir, se trouvaient hors de l'ombre. Je lui ai annoncé que si l'on mettait à la place de ce verre une lame de mica très-mince, ou une de ces feuilles de verre soufflé, il pourrait se faire que les franges intérieures ne sortissent pas de l'ombre, et qu'on les vît alors se porter du côté de la feuille transparente. Nous avons fait le lendemain cette expérience, et tout s'est passé comme je l'avais prédit ; il en a été enchanté. Il en a rendu compte lundi dernier à l'Institut, dans une note où il dit que mon Mémoire est de nature à faire une révolution dans la science. »

Fresnel a donc répété l'expérience d'Young des interférences par les bords d'un ruban ou d'un fil (figure 3.27) et vu d'abord disparaître les franges dans l'ombre du fil en interceptant la lumière sur un des bords du fil par un corps opaque, ce qui montre qu'il s'agit bien d'un phénomène d'interférence. L'insertion d'une lame de verre d'un côté augmente la différence de marche, ce qui déporte les franges en dehors de l'ombre, les

rendant ainsi invisibles. Il est curieux qu'ils n'aient pas immédiatement réalisé que le sens dans lequel se déplacent les franges lorsqu'on interpose la lame de verre implique que la lumière va moins vite dans le verre que dans l'air, ce qui est un argument majeur en faveur de la théorie ondulatoire.

Fresnel décrit dans un supplément à son second mémoire⁴⁵ l'expérience d'interférence avec des miroirs qui porte son nom (figure 3.31) :

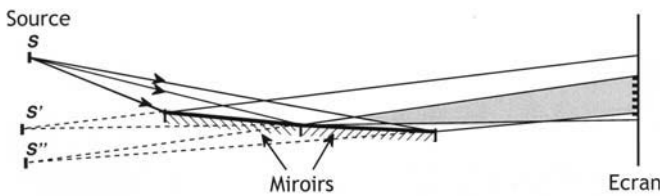


Figure 3.31. Les miroirs de Fresnel⁴⁶. C'est un dispositif d'interférences inventé par Fresnel, qui est beaucoup plus lumineux que celui des trous ou des fentes d'Young. Les deux miroirs, qui sont presque dans le même plan, donnent d'une source ponctuelle S (trou ou fente) deux images virtuelles S' et S'' qui jouent le rôle des deux trous de Young. Les franges d'interférence peuvent être observées dans la partie commune aux faisceaux réfléchis par les miroirs (en grisé).

« Pour éloigner toute idée de l'action des bords du corps, de l'écran ou des petits trous, dans la formation ou la disparition des franges intérieures, j'ai cherché à en produire de semblables au moyen du croisement des rayons réfléchis par deux miroirs, et j'y suis parvenu après quelques tâtonnements. [...] M. Arago y substitua deux miroirs de platine, et obtint des franges semblables. »

Puis il introduit le « mécanisme intégral » qui lui permet de calculer complètement les franges de diffraction par un bord d'écran (figure 3.27). La théorie des interférences et de la diffraction est donc entièrement établie. Mais les newtoniens, nombreux à l'Académie et alarmés par les progrès de Fresnel, tentent de prendre leur revanche en faisant organiser en février 1817 un concours sur l'explication de la diffraction par le bord d'un obstacle. Fresnel, et un autre personnage inconnu qui ne sera pas pris en considération, sont les seuls à répondre. La commission, constituée de Biot, Arago, Laplace, Gay-Lussac et Poisson, nomme Arago rapporteur. C'est le triomphe de Fresnel, qui reçoit le prix en mars 1819. Son mémoire couronné par l'Académie des sciences est un véritable traité d'optique ondulatoire ; il ne sera cependant publié qu'en 1826⁴⁷.

La bataille est terminée, mais pas la guerre car les newtoniens ne désarment pas devant l'évidence^m. Dans un épisode resté célèbre, Poisson essaiera de coincer Fresnel en prédisant par le calcul que si la théorie ondulatoire était exacte, on devrait voir un point lumineux au centre de l'ombre d'un écran circulaire éclairé par une source ponctuelle, ce qui lui paraît absurde. Cependant l'expérience confirmera cette prédiction, à la déconfiture de Poissonⁿ. Cela n'empêchera pas ce dernier d'être newtonien jusqu'à sa mort en 1840, et de rester l'adversaire de Fresnel. Biot lui-même, malgré ses nombreux travaux en optique, n'est pas encore converti à la théorie des ondulations à cette époque⁴⁸.

Reste à savoir si la lumière est une onde longitudinale ou une onde transversale, ce qui ne peut se démontrer avec les expériences classiques de diffraction et d'interférence. Il paraît évident à l'époque qu'elle doit être longitudinale : l'analogie de la lumière avec le son, qui est une onde longitudinale, avait été abondamment commentée au XVIII^e siècle et au début du XIX^e, et la propagation de la lumière dans l'éther est comprise comme une compression de cet éther. Comme Huygens, on fait l'analogie avec la propagation d'un ébranlement dans une série de billes d'acier en contact les unes avec les autres. Aussi ne se pose-t-on pas la question. Mais en 1816 Arago a l'idée d'une expérience nouvelle : on trouve en effet dans le *Mémoire sur l'action que les rayons de lumière polarisée exercent les uns sur les autres*, par MM. Arago et Fresnel⁴⁹ la phrase suivante :

« L'un de nous (M. Arago) imagine qu'il pourrait être curieux de rechercher si les actions que les rayons ordinaires exercent habituellement l'un sur l'autre ne seraient pas

^m Il est vrai que les arguments des partisans de la théorie ondulatoire ne sont pas toujours bons : par exemple, Arago cite dans sa *Notice biographique* sur Fresnel (OC t. 1, p. 107-185) des expériences infructueuses pour détecter ce que nous appelons aujourd'hui la pression de radiation (qui existe bel et bien), qui avait permis d'affirmer que la lumière n'était pas faite de particules, et remarque, assez judicieusement dans le contexte de l'époque, que « ce genre d'expériences et d'arguments dont on doit la première idée à Franklin, ne pourra jamais rien fournir de décisif ».

ⁿ Young avait déjà observé ce phénomène en examinant les artefacts de l'observation au microscope produits par la diffraction. Mais c'est probablement passé inaperçu en France.

modifiés quand on ne ferait interférer deux faisceaux lumineux qu'après les avoir polarisés. »

Fresnel écrit en 1816⁵⁰ :

« Dans nos expériences sur la diffraction, nous avons cherché, M. Arago et moi, si la polarisation n'aurait pas quelque influence sur la formation des franges intérieures des ombres, et nous n'en avons encore remarquée aucune. Nous avons abandonné ces recherches depuis plusieurs mois, lorsque j'y ai été ramené par de nouvelles observations.

J'avais essayé vainement de produire des franges au moyen des deux images d'un point lumineux devant lequel j'avais placé un rhomboïde de spath calcaire, malgré l'attention que j'avais eue de faire traverser au faisceau extraordinaire une plaque de verre, dont l'épaisseur était déterminée de manière à compenser à peu près la différence du nombre des ondulations formées dans le cristal par les rayons ordinaires et extraordinaires, en sorte qu'en l'inclinant légèrement je pouvais établir une compensation exacte.[...]

M. Arago [...] a pensé qu'il était nécessaire de vérifier encore ce principe [c'est-à-dire l'absence d'interférences entre deux faisceaux polarisés perpendiculairement l'un à l'autre] par une expérience directe.[...] Il me paraissait difficile d'obtenir deux faisceaux lumineux polarisés dans des plans rectangulaires, en remplissant d'ailleurs [lire : par ailleurs] toutes les conditions nécessaires pour faire naître des franges. Mais M. Arago a levé cette difficulté en imaginant un moyen commode de polariser les deux faisceaux en sens contraire sans changer leur direction. »

Le « moyen commode » d'Arago consiste à faire l'expérience des fentes d'Young, en plaçant devant chacune des fentes une pile de lames de mica inclinées de façon à polariser entièrement la lumière^o. Lorsque les faisceaux des deux fentes sont polarisés perpendiculairement l'un à l'autre en disposant les piles de lames de façon appropriée, les franges ne sont plus visibles. Les expériences de Fresnel et d'Arago montrent que « *l'apparition des franges est impossible lorsque les deux faisceaux lumineux qui doivent concourir à leur production sont polarisés en sens contraire* ».

^o Les piles de lames de mica ou de verre, ou les lames de tourmaline (un borosilicate d'aluminium biréfringent mais où un des rayons polarisés est absorbé sélectivement) utilisées plus tard, sont l'équivalent de nos modernes films polaroid.

Malgré sa perspicacité, Fresnel va mettre plusieurs années à comprendre ce qui se passe. Il ne donne son interprétation qu'en 1821⁵¹ :

« M. Ampère, à qui j'avais communiqué ces résultats de l'expérience, [et moi] sentîmes l'un et l'autre que ces phénomènes s'expliqueraient avec la plus grande simplicité, si les mouvements oscillatoires des ondes polarisées n'avaient lieu que dans le plan même des ondes. Mais que devenaient les oscillations longitudinales suivant les rayons ? [...] »

Ces difficultés me semblèrent si embarrassantes que je négligeai notre première idée, et continuai de supposer des oscillations longitudinales dans les rayons polarisés, en y admettant en même temps des mouvements transversaux, sans lesquels il m'a toujours paru impossible de concevoir la polarisation et la non-influence mutuelle des rayons polarisés à angle droit. Ce n'est que depuis quelques mois qu'en méditant avec plus d'attention sur ce sujet, j'ai reconnu qu'il était très probable que les mouvements oscillatoires des ondes lumineuses s'exécutaient uniquement suivant le plan de ces ondes, pour la lumière directe comme pour la lumière polarisée. [Suit une « explication » mécanique en termes de vibrations de l'éther.] [...] »

Je dois dire ici qu'un article d'une lettre de M. Young, en date du 29 avril 1818, qui m'avait été communiquée par M. Arago, a contribué à me faire douter de l'existence des oscillations longitudinales. M. Young concluait [...] que les ondulations de l'éther pourraient bien ressembler à celles d'une corde tendue d'une longueur indéfinie, et se propager de la même manière. »

Mais si Fresnel a sauté le pas, il n'en est pas de même de Young, et Arago sera très long à accepter l'hypothèse de Fresnel et d'Ampère. Arago a visiblement hésité à présenter un rapport à l'Académie sur le mémoire où Fresnel expose sa découverte, rapport dont il était chargé avec Ampère et Joseph Fourier. Il écrit en effet⁵² :

« Le Mémoire dont nous venons de présenter l'analyse renferme un chapitre fort étendu, dans lequel M. Fresnel expose ses idées théoriques sur le genre particulier d'ondulations qui, suivant lui, constituent la lumière ; le temps ne nous a pas encore permis de l'examiner avec toute l'attention nécessaire. »

Or le passage correspondant du mémoire n'est long que d'une page ! Arago ne parle de vibrations

transversales ni dans son article de revue pour l'*Encyclopédie Britannique*, ni dans sa Notice biographique sur Fresnel, qui date de 1830^P. Les éditeurs des *Œuvres complètes de Fresnel* ont inséré en note de la p. 635 du tome 1 la remarque suivante :

« [Arago] a souvent raconté dans la suite, dit M. Whewell⁵³, qu'après que Fresnel et lui eurent prouvé par leurs expériences communes la non-interférence des rayons polarisés à angle droit, alors que Fresnel eût reconnu que les vibrations transversales étaient le seul moyen de concilier ce fait avec la théorie ondulatoire, Arago affirma qu'il n'aurait jamais le courage de publier une pareille conception, et d'un commun accord le nom de Fresnel parut seul en tête de la seconde partie du mémoire.[...] M. Arago aurait peut-être adopté tout de suite la conception des vibrations transversales, lorsqu'elle fut proposée par son collaborateur, s'il n'avait pas été membre de l'Institut, et n'avait pas eu à supporter le choc de l'ennemi (the brunt of war), dans les discussions fréquentes qui avaient pour objet la doctrine des ondulations, Laplace et d'autres membres influents se montrant si opposés à cette théorie qu'ils ne voulaient pas même « écouter avec quelque patience les arguments qu'on présentait en sa faveur. »

Il y a peut-être une raison plus scientifique à la perplexité d'Arago. L'existence d'une onde transversale implique une modification de la notion d'éther, lequel doit maintenant être rigide, donc cristallin. On en revient ainsi à l'éther cristallin d'Aristote, ce qui rebute Arago⁵⁴. Ce dernier n'acceptera finalement l'idée des vibrations transversales qu'en 1852, dans un mémoire qui présente le résumé de ses recherches avec Fresnel⁵⁵. L'éditeur de ses *Œuvres complètes*, Barral, écrit à ce propos⁵⁶ :

« M. Arago a pris soin de faire remarquer que les ondulations de la lumière s'effectuent perpendiculairement à la ligne que suit la propagation. »

^P Assez curieusement, Arago lui-même se place quelquefois dans le cadre de la théorie corpusculaire au moins jusqu'en 1842. S'agit-il simplement d'un désir de ne pas provoquer de nouvelles discussions à l'Académie lorsque cette théorie ne joue pas un rôle crucial dans les analyses ?

Encadré 3.8. L'explication mécaniste de la réflexion de la lumière par Fresnel⁵⁸

Voici le raisonnement de Fresnel concernant la réflexion vitreuse (figure 3.32), dont il dit qu'il a été vérifié rigoureusement par Poisson. Il repose sur la conservation de la quantité de mouvement. Fresnel avait proposé en 1815 « *que dans l'inflexion [lire : réfraction] et la réflexion ce sont les molécules mêmes des corps qui reproduisent les mouvements vibratoires imprimés par les rayons incidents* ». Il considère d'abord ce qui se passe pour la composante polarisée dans le plan d'incidence et de réflexion ; il admet qu'un élément différentiel de masse m du premier milieu dans lequel arrive la lumière acquiert une vitesse v proportionnelle au déplacement de l'éther produit par le rayon incident, puis entraîne en glissant sur lui-même l'élément différentiel contigu, de masse m' , du deuxième milieu où pénètre la lumière. Alors la conservation de la quantité de mouvement implique que leur vitesse commune est $mv/(m+m')$ si v est la vitesse initiale de m , et la vitesse perdue par m est $v - mv/(m+m') = m'v/(m+m')$. Puis, après séparation des deux masses, m , qui assure maintenant la réflexion, « doit recevoir, en sens contraire, toute la partie de la vitesse initiale qu'il a perdue » : la vitesse finale de m qui correspond à la réflexion est donc $mv/(m+m') - m'v/(m+m') = v(m-m')/(m+m')$. L'onde réfléchie étant alors produite par la masse m avec une amplitude proportionnelle à sa vitesse, le rapport des amplitudes de l'onde réfléchie et de l'onde incidente est celui des vitesses de l'élément m avant et après le phénomène, et le rapport de leurs intensités est son carré, soit $(m-m')/(m+m')$ ². Quant à la lumière transmise, elle est produite par le mouvement de l'élément m' , avec une intensité complémentaire. Il faut donc connaître le rapport des masses m et m' des éléments différentiels. Fresnel admet que c'est celui des masses qui sont contenues dans un faisceau lumineux de part et d'autre de la surface de séparation, dans une épaisseur égale à une longueur d'onde le long du rayon lumineux ; il suppose également que les masses spécifiques (densités) de ces éléments sont inversement proportionnelles au carré de la vitesse de

la lumière dans chaque milieu, ce qui n'est que très approximatif. Il obtient ainsi $m'/m = \operatorname{tgr}/\operatorname{tgi}$, où i et r sont respectivement l'angle d'incidence et l'angle de réfraction, qui sont tels que $\sin i = (v_1/v_2) \sin r$, où v_1 et v_2 sont respectivement les vitesses de la lumière dans le premier et le deuxième milieu. Fresnel finit par trouver le résultat exact pour le coefficient de réflexion de la composante polarisée parallèle au plan de d'incidence et de réflexion : $R_{\parallel} = [\operatorname{tg}(i-r)/\operatorname{tg}(i+r)]^2$. Puis, en utilisant la déviation « observée par Arago » du plan de polarisation du rayon réfléchi, il déduit empiriquement la formule pour le coefficient de réflexion de l'autre composante polarisée, qu'il trouve égale à $[\sin(i-r)/\sin(i+r)]^2$. Donc, par ce raisonnement mécanique discutable combiné à une observation, il obtient les bonnes formules de la réflexion vitreuse, incluant la polarisation ! Ce raisonnement sera enseigné pendant tout le XIX^e siècle. Il convient cependant de remarquer qu'il n'est pas très différent de celui de certaines démonstrations actuelles qui évitent de passer par les équations de Maxwell⁵⁹, démonstrations dans lesquelles la réflexion et la réfraction sont expliquées par l'action du champ électrique de l'onde sur les électrons du milieu, puis la ré-émission d'une onde par ces électrons qui jouent donc le rôle des éléments différentiels de Fresnel.

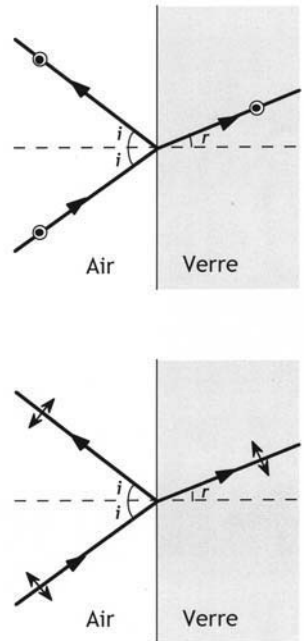


Figure 3.32. Réflexion et réfraction entre deux milieux transparents. En bas, polarisation dans le plan d'incidence et de réflexion, le cas étudié par Fresnel ; en haut, polarisation perpendiculaire à ce plan.

Au vu de l'obstination de beaucoup de ses contemporains à refuser la théorie ondulatoire, il n'est pas surprenant qu'Arago se soit déterminé à réaliser l'« expérience cruciale » qui éliminera définitivement la théorie de l'émission, expérience dont nous parlerons au chapitre suivant. En attendant, Fresnel parachève son œuvre et donne une théorie complète et quantitativement exacte de la réflexion vitreuse, de la double réfraction du spath, de la polarisation rotatoire chromatique découverte par Arago, et en général de presque tous les phénomènes connus à l'époque où intervenait la nature ondulatoire de la lumière. Nous ne pouvons nous étendre davantage sur ce travail génial, nous contentant simplement de remarquer que toutes ses explications et calculs reposent sur un raisonnement mécanique qui utilise la conservation de la quantité de mouvement, raisonnement dont on trouve

l'origine chez Young (encadré 3.8)⁹. Ce raisonnement n'a pas convaincu tout le monde, comme on peut le voir par l'extrait suivant du *Traité de la lumière* de l'astronome John Herschel, le fils du grand William Herschel⁵⁷ :

« Nous avouerons que ni la doctrine corpusculaire, ni celle des ondulations, ni aucun système proposé jusqu'à ce jour, ne donnent une explication complète de tous les phénomènes qui se rapportent à la lumière. À tout moment, il faut admettre des modes d'action particuliers, pour des forces entièrement inconnues. »

La situation restera bloquée jusqu'au début du xx^e siècle, où la théorie électromagnétique de Maxwell (qui croit toujours à l'existence de l'éther), puis l'abandon de l'idée de la propagation de la lumière dans l'éther au profit de celle de sa propagation dans le vide, fourniront enfin une solution satisfaisante.

Après Fresnel, Arago et Biot, il y aura assez peu de progrès en optique physique jusqu'à James Clerk Maxwell ; il est vrai que Fresnel a bien déblayé le terrain. Augustin Cauchy encombrera les *Comptes rendus* d'énormes articles très mathématiques qui n'apporteront pas grand chose de nouveau, à l'exception de calculs de la polarisation par réflexion sur les surfaces métalliques, confirmés par les observations de Jules-Célestin Jamin⁶⁰. Des innovations sont cependant dues d'une part à l'astronome anglais George Biddell Airy, qui étudie en 1835 la diffraction par une ouverture circulaire, et à Jacques Babinet. Celui-ci est l'auteur du principe selon lequel la diffraction par les bords d'une ouverture est complémentaire de celle produite par un écran ayant la même forme. Il montre aussi que « les vibrations de la lumière polarisée s'exécutent dans le plan même de polarisation, contrairement à ce qu'admettait Fresnel. »⁶¹ Enfin on peut citer une curiosité découverte et expliquée en 1832 par Sir William Rowan Hamilton et Humphrey Lloyd à Dublin : la réfraction conique qui se produit dans les cristaux bi-axes, dans laquelle un rayon incident est réfracté en un cône ou un cylindre lumineux⁶². Mais tout cela est peu de chose par rapport à la véritable

⁹ Ce type de raisonnement sera développé à fond par Augustin Cauchy dans un nombre considérable de publications particulièrement illisibles qui ont dû donner bien du travail aux imprimeurs.

révolution qui sera apportée par la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell.

L'infrarouge et l'ultraviolet

Le rayonnement infrarouge a été découvert par William Herschel vers 1800, en observant l'échauffement d'un thermomètre placé dans le spectre du Soleil au-delà des radiations rouges. Mais personne, à l'exception notable de Young, ne comprend à l'époque qu'il s'agit d'un simple prolongement du rayonnement optique : au contraire, Delamétherie, en rapportant cette découverte dans son *Journal de Physique*⁶³, dit que Herschel en a conclu « *que la lumière diffère de la chaleur* », ce qui n'est qu'en partie exact. On parle plutôt de « *chaleur rayonnante* » à propos de ce phénomène. Joseph Fourier parle de « *rayons de chaleur invisible mêlés à la lumière du Soleil* »⁶⁴. En 1801, l'allemand Johannes Wilhelm Ritter et l'anglais Francis Wollaston découvrent que le Soleil émet aussi des « *rayons invisibles* » qui font noircir le chlorure d'argent : ce sont les rayons ultraviolets, qui prolongent le spectre visible au-delà du violet. On les a souvent appelés « *rayons chimiques* ». Mais tout ceci reste bien confus. Par exemple, Gay-Lussac et Thenard écrivent en 1811⁶⁵ :

« Quoiqu'il paraisse démontré par les diverses expériences que nous avons rapportées, que toutes les fois que la lumière produit des changements chimiques dans les corps, on peut aussi les produire par la chaleur, il est bien difficile de décider, dans l'état actuel de nos connaissances, si c'est effectivement parce-que la lumière produit de la chaleur dans les corps qui l'absorbent, qu'elle agit chimiquement sur eux. C'est suivant nous, ce qu'il y a de plus probable ; mais on a découvert depuis quelque temps des propriétés si singulières de la lumière, qu'on ne saurait encore réconcilier les effets qu'elle produit avec ceux de ses divers rayons. [Et en note :] En effet, on a trouvé que l'action chimique du rayon violet était plus grande que celle des autres rayons, même du rayon rouge ; et cependant on sait que le rayon violet échauffe moins la boule du thermoscope que le rayon rouge. »

Après la mort de Fourier, Arago prononce le 18 novembre 1833 son *Éloge historique de Joseph Fourier*⁶⁶, qui contient des informations historiques intéressantes sur le « *calorique rayonnant* ». On y lit :

« Les célèbres académiciens del Cimento [à Florence] trouvaient, il y a près de deux siècles, que ce calorique se réfléchit comme la lumière ; qu'ainsi que la lumière, un miroir concave le réfléchit à son foyer. En substituant des boules de neige à des corps échauffés, ils allèrent même jusqu'à prouver qu'on peut former des foyers frigorifiques par voie de réflexion.

Quelques années après, Mariotte, membre de cette académie [celle de Paris], découvrit qu'il existe différentes natures de calorique rayonnant ; que celui dont les rayons solaires sont accompagnés, [l'infrarouge proche] traverse tous les milieux diaphanes aussi facilement que le fait la lumière ; tandis que le calorique qui émane d'une matière fortement échauffée, mais encore obscure ; tandis que les rayons de calorique, qui se trouvent mêlés aux rayons lumineux d'un corps médiocrement incandescent, [l'infrarouge lointain] sont arrêtés presque en totalité dans leur trajet au travers de la lame de verre la plus transparente. »

L'examen des textes originaux montre qu'Arago les a quelque peu surinterprétés à la lumière des connaissances récentes⁶⁷.

Les choses vont s'accélérer : en 1835, Ampère va intervenir avec sa perspicacité habituelle en exposant sa conception, qui finira par prévaloir⁶⁸ :

« Elle consiste à considérer la chaleur rayonnante comme une série d'ondulations excitées dans l'éther par les vibrations des corps chauds. Ces ondulations seraient plus longues que les ondes qui constituent la lumière, si la source calorifique est obscure : mais dans le cas des sources qui sont en même temps calorifiques et lumineuses, il y aurait toujours un groupe d'ondes possédant simultanément les deux propriétés de chauffer et d'illuminer. Ainsi, dans cette manière de voir, aucune différence essentielle n'existerait entre le calorique rayonnant et la lumière. »

Arago est bien près de partager cette opinion. En 1836, il parle⁶⁹

« des trois propriétés que possède la lumière quand elle nous arrive du soleil : 1° celle d'éclairer ; 2° celle d'échauffer ; 3° celle de détruire ou de déterminer des combinaisons chimiques, »

ce qui laisse à penser qu'il commence à réaliser que la chaleur rayonnante et les rayons chimiques sont des sortes de lumière.

Encadré 3.9. Macedonio Melloni (1798-1854)

Né à Parme, Melloni est nommé professeur de physique à l'université de cette ville en 1824, mais il doit s'exiler à Genève puis à Paris en 1831 après avoir manifesté publiquement sa satisfaction de la chute du roi de France, Charles X. Il est aidé par Arago, qui, avec Humboldt, intervient en 1839 auprès de Metternich pour lui permettre de revenir en Italie. Il y est nommé directeur du Conservatoire des arts et métiers de Naples, où il dirige également l'Observatoire météorologique du Vésuve. Démis à nouveau de ses fonctions en 1849 pour des motifs politiques, il se retire à Portici où il meurt du choléra cinq ans plus tard. Melloni est surtout connu pour son travail sur le rayonnement infrarouge dont il découvre diverses propriétés grâce à sa thermopile, mais il fonde également le paléomagnétisme. Il découvre que les laves volcaniques sont aimantées et que leur aimantation a été acquise dans le champ magnétique terrestre au cours de leur refroidissement : elle indique donc l'orientation du champ magnétique à l'époque de ce refroidissement.

Malgré ses nombreuses expériences sur la réflexion, la réfraction et la polarisation de la chaleur rayonnante, le spécialiste et ami d'Arago qu'est Macedonio Melloni (Encadré 3.9) ne croit cependant pas à l'explication d'Am père. Il est encore persuadé en 1837 que lumière et chaleur sont de nature différente, bien qu'il y ait beaucoup de points communs. Il en dit en effet ⁷⁰ :

« Les lois de ces deux grands agents de la nature et les modifications qu'ils éprouvent par l'action de la matière pondérable, sont les mêmes tant que leurs rayons peuvent se mouvoir librement. De nombreuses différences se manifestent aussitôt que la marche des deux rayonnements souffre une interception quelconque, soit à la surface, soit dans l'intérieur des corps. »

Pour Melloni, comme pour la plupart de ses contemporains, la chaleur rayonnante est plutôt à rapprocher de celle qui se propage lentement à l'intérieur des corps,

celle qu'a étudiée Fourier. Cependant, en 1842, Melloni change d'avis et se rallie à Ampère⁷¹ :

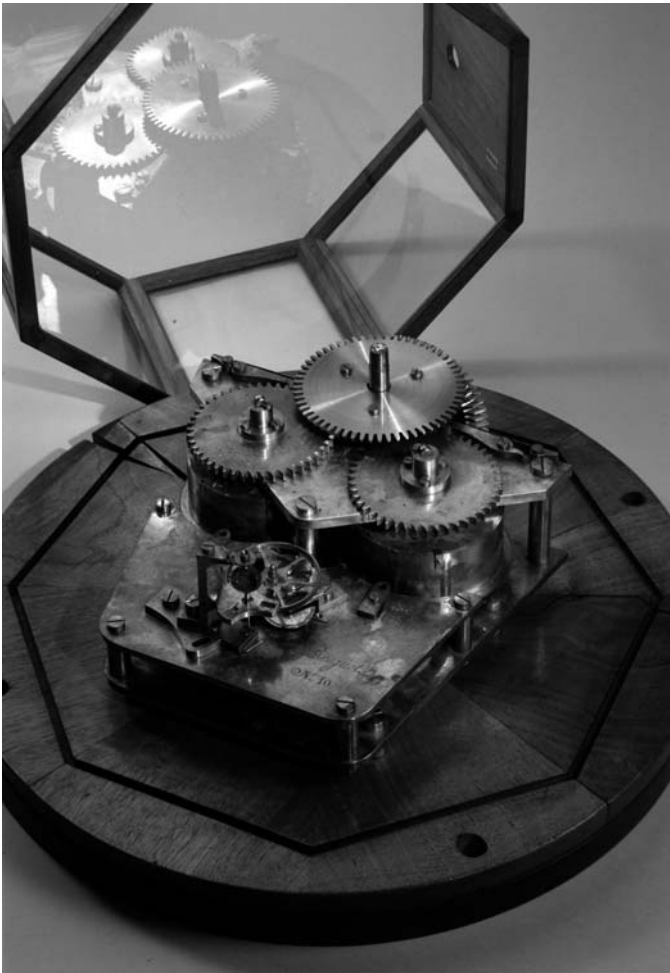
« La lumière, la chaleur et les réactions chimiques [c'est-à-dire en fait l'ultraviolet qui produit ces réactions] sont trois manifestations des ondulations éthérées qui constituent les radiations solaires. Les ondulations obscures, douées de l'action chimique ou calorifique, sont parfaitement semblables aux ondulations lumineuses ; elles en diffèrent seulement par la longueur d'onde, »

ce qu'ont confirmé cinq ans après, pour l'infrarouge, les magnifiques expériences d'interférences et de diffraction de Fizeau et de Foucault⁷². Cependant ces expériences semblent avoir été largement ignorées, et en 1868 Jamin parle encore, dans son cours de physique à l'École polytechnique, de l'« identité probable de la chaleur et de la lumière ».

L'ultraviolet a moins résisté. Young, puis Arago (en 1821) avaient déjà fait des expériences d'interférence sur les « rayons chimiques » impressionnant un papier imbibé de chlorure d'argent⁷³. Puis Edmond Becquerel découvre en 1842, au moyen de la photographie, des raies de Fraunhofer dans le spectre ultraviolet du Soleil, semblables à celles que l'on connaissait dans le visible⁷⁴. Tout le monde s'est alors persuadé que les rayons chimiques sont semblables à la lumière et n'en diffèrent que par leur longueur d'onde plus courte.

Chapitre 4

La vitesse de la lumière



Miroir tournant et son mécanisme, construit par Louis Breguet pour Arago en 1844. Avec quelques modifications, il a été utilisé par Fizeau pour la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau.

La constance de la vitesse de la lumière

Dans sa biographie d'Arago¹, Maurice Daumas écrit qu'Arago a réalisé une expérience qui annonce la théorie de la relativité :

« Arago avait démontré que la lumière se propage avec la même vitesse quel que soit le corps dont elle émane.[...] [Il montra aussi] l'impossibilité de mettre en évidence le mouvement absolu de la Terre. La question n'a pas cessé de préoccuper les physiciens. À la fin du XIX^e siècle, Albert Michelson essaya de la résoudre par une expérience célèbre qui échoua également. C'est en considérant le résultat de ces expériences qu'Einstein fut amené à étendre le principe de relativité mécanique aux phénomènes électromagnétiques et optiques. « Il est impossible, dit ce principe, par des expériences de physique faites à l'intérieur d'un système, de mettre en évidence un mouvement rectiligne et uniforme de l'ensemble de ce système. »

Le jeune historien des sciences avait quelque peu été emporté par son sujet (il fut plus tard beaucoup plus rigoureux). Nous allons voir ce qu'il en est réellement : l'expérience d'Arago est certes intéressante, mais elle n'a nullement démontré les propriétés dont il est question. Elle a surtout donné des arguments très forts contre la théorie corpusculaire de Newton. Il faut la replacer dans son contexte pour l'interpréter correctement, ce qui n'a pas été toujours le cas, et pour en apprécier la signification et l'importance². Mais il nous faut d'abord parler de l'aberration de la lumière provenant des étoiles.

L'aberration

L'aberration est un fait d'observation courante : le son qui nous parvient d'un avion en mouvement paraît provenir d'un point en arrière de sa position visible, car l'avion a avancé pendant le temps que le son a mis à nous parvenir. Une autre manifestation est le fait qu'une pluie verticale paraît tomber obliquement lorsque nous nous déplaçons. C'est donc un effet purement géométrique, qui n'a rien à voir avec une quelconque composition des vitesses.

Pour les astronomes, l'aberration, qui est due à la nature finie de la vitesse de la lumière, a pour conséquence que toutes les étoiles effectuent un mouvement apparent

annuel dont l'amplitude totale est d'environ 40 secondes de degré. Ce mouvement fut observé au XVII^e siècle par plusieurs astronomes, notamment sur l'étoile polaire ; comme il n'en comprenait pas la cause, Jean-Dominique Cassini le qualifia d'*aberrant*, d'où le nom qui lui est resté. C'est l'anglais James Bradley qui a expliqué pour la première fois en 1727 ce phénomène, qu'il avait observé avec beaucoup de soin sur l'étoile γ Draconis³. Cette explication est très simple (figure 4.1) ; le résultat est que la déviation maximale de l'étoile par rapport à sa position moyenne, exprimée en radians, est le rapport de la vitesse de la Terre sur son orbite (environ 30 kilomètres par seconde) à la vitesse de la lumière (environ 300 000 kilomètres par seconde) : ceci correspond à $20,4''$ ^a.

Bradley s'est posé la question de savoir si la vitesse de la lumière dépendait de l'étoile qui l'émettait, auquel cas l'aberration aurait eu une valeur numérique différente pour les différentes étoiles. Il ne vit aucun effet, mais la précision sur sa mesure de l'aberration ne dépassant pas 1 seconde de degré, il n'aurait pu observer que des variations de la vitesse de la lumière supérieures à 5 %.

John Michell et les variations de la vitesse de la lumière

Cependant on s'attendait à ce que l'effet existât. L'anglais John Michell pensait que, selon la théorie newtonienne de la lumière qui était très généralement admise en Angleterre à cette époque, les corpuscules de lumière émis par une étoile seraient ralentis par l'attraction gravitationnelle de cette étoile : la vitesse de la lumière devait donc être plus ou moins grande selon la masse et le rayon de l'étoile. On ne savait encore rien sur ces quantités, mais on pensait que l'effet pourrait être important (après tout, Bradley n'avait observé que peu d'étoiles), et l'on imaginait même que la gravité de certaines étoiles pourrait être suffisamment grande pour empêcher la lumière d'en sortir. Michell écrit en 1783, dans un article⁴ auquel il est nécessaire de se rapporter pour comprendre les travaux d'Arago :

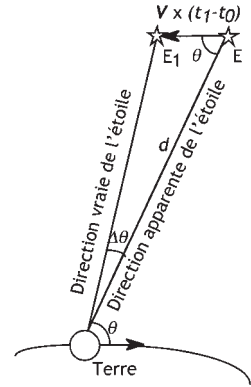


Figure 4.1. Explication de l'aberration des étoiles. Il est commode de se placer dans le système de la Terre : l'observateur O est fixe et les étoiles ont une vitesse apparente V opposée à celle de la Terre. Au temps t_0 l'étoile est en E , et sa lumière parvient en O au temps t_1 . L'intervalle $t_1 - t_0$ est le temps mis par la lumière pour parcourir la distance d de l'étoile à la vitesse c : donc $d = c(t_1 - t_0)$. À l'instant t_1 , l'étoile s'est déplacée à la position E_1 telle que $EE_1 = V(t_1 - t_0)$. La direction vraie de l'étoile est donc OE_1 tandis que sa direction apparente est OE . L'angle entre ces deux directions est $\Delta\theta = (EE_1/d) \sin\theta = (V/c) \sin\theta$ (le temps $t_1 - t_0$ s'élimine) : il ne dépend pas de la distance de l'étoile. La direction de la vitesse de la Terre change au cours de l'année, si bien que la position apparente E de l'étoile décrit en un an une ellipse autour de E_1 , de demi grand axe V/c . L'angle $\Delta\theta$ est ici très exagéré.

^a On admet ici pour simplifier que l'orbite terrestre est un cercle.

« S'il existe dans la nature des corps dont la densité n'est pas inférieure à celle du Soleil, et dont le diamètre dépasse 500 fois celui du Soleil, leur lumière ne pourra pas arriver jusqu'à nous.[...] Mais si quelque autre corps lumineux tourne autour d'eux, nous pourrions peut-être déduire l'existence du corps central de la révolution de ce corps^b. »

Michell envisage ensuite ce qui se passe lorsque la lumière ralentie qui provient d'une étoile pénètre dans un milieu transparent dense, comme le verre. Dans la théorie corpusculaire de Newton, la réfraction correspond à une augmentation de la vitesse de la lumière lorsqu'elle pénètre d'un corps peu dense dans un corps plus dense (voir la figure 3.3). Michell écrit :

« Supposons avec Sir Isaac Newton (voir son *Optique*, prop. VI, paragr. 4 et 5) que la réfraction de la lumière est produite par une force qui l'attire vers le milieu dense, une hypothèse qui rend compte parfaitement de toutes les observations [sic !]. Dans cette hypothèse, la vitesse de la lumière dans un milieu, quelle que soit la direction sous laquelle elle y arrive, sera toujours dans un certain rapport avec la vitesse qu'elle avait avant son arrivée, et les sinus des angles d'incidence et de réfraction seront dans le rapport inverse de ces vitesses. »

L'augmentation de vitesse est supposée due à une « force » produite par ce milieu (en termes modernes, une augmentation de l'énergie cinétique des particules de lumière, dont il faut rappeler qu'elles sont à l'époque supposées avoir une masse). Michell fait l'hypothèse logique, mais arbitraire — et cela ne semble pas lui poser de problème — que cette « force » est une propriété du milieu qui ne dépend pas de la vitesse des particules. Il fait alors un petit calcul que nous allons reproduire sous une forme

^b Des objets de ce genre existent bien, encore que leurs propriétés soient très différentes de celle qu'imaginait Michell : ce sont les trous noirs. Mais la raison pour laquelle on ne voit pas leur lumière, qui est un effet de relativité générale, est très différente de celle qu'il proposait : l'espace-temps est localement très déformé, la vitesse de la lumière est inchangée, mais le décalage des longueurs d'onde vers le rouge est infini. En ce qui concerne les étoiles « normales », l'effet de leur gravitation sur la lumière émise est très faible, même pour les astres très compacts que sont les naines blanches ; ici aussi, la vitesse de la lumière n'est pas affectée, mais seulement la longueur d'onde.

moderne, qui montre que l'angle de réfraction dépend de la vitesse de la lumière.

Soit v_1 la vitesse incidente de la lumière, et v_2 la vitesse dans le corps dense. La relation entre l'angle d'incidence i sur la surface de séparation et l'angle réfracté r s'écrit dans la théorie newtonienne :

$$\sin i / \sin r = v_2 / v_1$$

Par ailleurs la relation entre v_2 et v_1 s'écrit :

$$1/2 m v_2^2 = 1/2 m v_1^2 + A$$

où m est la masse de la particule de lumière et A une constante caractéristique du corps dense, qui représente l'augmentation de l'énergie cinétique des particules de lumière. On peut aussi écrire cette équation :

$$v_2 = (v_1^2 + 2A/m)^{1/2}$$

Cette relation n'est pas linéaire, si bien que v_2 n'est pas proportionnel à v_1 et que le rapport v_2/v_1 , donc l'angle réfracté, varie si la vitesse d'arrivée des particules de lumière change. On peut donc, dans cette théorie, rechercher si la vitesse v_1 diffère pour les différentes étoiles en observant les changements correspondants dans la réfraction. Michell écrit :

« On peut considérer qu'un prisme de petit angle sera un instrument approprié pour cette mesure : car pour un prisme dont l'angle de réfraction [lire : l'angle entre les faces] est d'une minute de degré, par exemple, une lumière dont la vitesse n'est pas diminuée serait déviée de 33'', et si sa vitesse est diminuée [de 5 pour cent dans son exemple numérique], d'environ 35'',80, la différence étant de presque 2'',53. »

Il remarque que pour augmenter la sensibilité :

« le prisme [...] devrait avoir un angle de réfraction bien plus grand que celui que nous avons proposé, en le construisant de façon achromatique, selon les principes de Mr. Dollond^c. [...] On serait [alors] probablement capable de découvrir des diminutions beaucoup plus petites de la vitesse de la lumière, peut-être de 1/100, de 1/200, de 1/500 ou même de 1/1000, ce qui serait produit [...] par des sphères dont les diamètres

^c L'anglais John Dollond a construit en 1757 les premiers objectifs achromatiques de lunettes en associant une lentille convergente de verre crown à une lentille divergente de verre flint.

seraient respectivement 70, 50, 30 et 22 fois celui du Soleil, en supposant qu'elles ont la même densité que celui-ci. »

L'enjeu de ces mesures est grand. Michell espère en effet que l'on puisse mesurer avec une lunette au grossissement suffisant le diamètre angulaire de certaines étoiles ; en mesurant la diminution de vitesse de la lumière qui en parviendrait, on estimerait leur diamètre linéaire en supposant qu'elles ont la même densité que le Soleil, et on obtiendrait leur distance en comparant diamètre angulaire et diamètre linéaire. Cette méthode n'a évidemment jamais abouti pour deux raisons : d'une part la théorie de Newton est fautive, et d'autre part la relativité restreinte montre que la vitesse de la lumière ne dépend pas des propriétés de sa source.

L'expérience d'Arago

Nommé en 1805 secrétaire-bibliothécaire de l'Observatoire de Paris, Arago commence aussitôt des expériences sur la réfraction des gaz sous la responsabilité de Biot, et participe à l'activité proprement astronomique de l'Observatoire : mesures de positions d'étoiles pour préciser la latitude de Paris, réduction de données pour la détermination d'orbites de comètes.

Il s'intéresse aussi à la vitesse de la lumière, peut-être à l'instigation de Laplace. Il cherche à voir si la vitesse de la lumière est différente d'une étoile à l'autre. D'autre part — et ceci est nouveau par rapport à Michell — il essaye de détecter une variation éventuelle de la vitesse de la lumière lorsque la Terre se rapproche ou s'éloigne de l'étoile. Il fait dans le dernier cas l'hypothèse implicite, qui est alors considérée comme évidente par tous, que la vitesse de la Terre s'ajoute ou se retranche simplement à la vitesse de la lumière (la relativité restreinte nous a montré que c'est faux, la vitesse de la lumière dans le vide étant constante). Arago doit donc chercher dans le premier cas si l'angle de déviation par un prisme de la lumière de l'étoile change d'une étoile à l'autre, et dans le deuxième cas si cet angle varie à différentes époques de l'année pour une même étoile, la vitesse de la Terre étant alors orientée différemment par rapport à la direction de l'étoile.

Le travail d'Arago est décrit dans un mémoire présenté à l'Institut le 10 décembre 1810, mais non publié ; il l'a retrouvé peu avant sa mort en 1853 et fait publier par

l'Académie des sciences « sans en changer un seul mot »⁵. Il y écrit :

« Si on se rappelle que la déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en pénétrant obliquement dans les corps diaphanes est une fonction déterminée de leur vitesse primitive, on verra que l'observation de la déviation totale à laquelle ils sont assujettis en traversant un prisme fournit une mesure naturelle de leur vitesse. »

En 1805-1806, Arago expérimente avec un prisme d'angle 45', dont la dispersion est suffisamment petite pour lui permettre de travailler en lumière blanche. Il observe avec et sans prisme des sources artificielles de lumière, des étoiles, le Soleil, la Lune, les planètes. Il constate que la déviation de leur lumière par le prisme est toujours égale à 25', avec des écarts de 5 secondes de degré au plus, qu'il considère avec raison comme dûs aux erreurs de mesure. Il en déduit que les variations de la vitesse de la lumière ne dépassent pas 1/480. L'existence de grandes variations de la vitesse de la lumière d'une étoile à l'autre est donc fortement mise en doute. Ce résultat fait grand bruit car il paraît en contradiction avec la théorie corpusculaire.

Arago est alors envoyé mesurer le méridien de Barcelone aux îles Baléares, et l'affaire reste en suspens jusqu'à son retour en 1809. À ce moment, le mémoire où il avait décrit en 1806 ses premières observations n'avait pas encore été examiné par un rapporteur. Aussi Delambre s'empresse-t-il de présenter un rapport sur ce mémoire à la Première classe de l'Institut (le nom provisoire de l'Académie des sciences) le 4 septembre 1809 : le travail d'Arago est certainement un des éléments qui ont favorisé son élection à l'Institut deux semaines plus tard. Arago décide alors de faire de nouvelles mesures avec un prisme de plus grand angle, mesures qui ont lieu principalement en 1810. Comme cette fois la dispersion du prisme devient gênante si l'on observe en lumière blanche, mais qu'il a besoin de cette lumière pour faire des mesures précises, Arago fait construire un prisme achromatique, c'est-à-dire de dispersion négligeable, pour pouvoir travailler en lumière blanche (figure 4.2). Il est facile de voir, en se plaçant dans l'hypothèse corpusculaire et en suivant le raisonnement de Michell, que cette amélioration ne peut pas perturber le résultat de la mesure.

Il est curieux que la démarche expérimentale d'Arago suive exactement ce que proposait Michell : utilisation

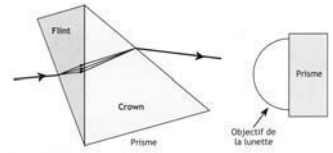


Figure 4.2. Le prisme achromatique d'Arago. La lumière entre dans un prisme de verre flint, où elle est dispersée de façon différente selon sa couleur, puis dans un prisme de crown collé au précédent, qui corrige la dispersion du flint ; finalement, l'angle dont la lumière est déviée est le même quelle que soit sa couleur, ce qui permet d'observer en lumière blanche. On ne sait pas quelle orientation avait le prisme par rapport à la lumière incidente. Dans sa dernière série d'observations, Arago plaçait une série de deux prismes achromatiques collés ensemble devant la moitié de l'objectif d'une lunette, comme indiqué à droite.

d'un prisme de petit angle, puis d'un prisme achromatique. Ce n'est probablement pas un hasard. Arago pouvait avoir eu connaissance de l'article de Michell car les *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, où il avait été publié, figurent dans la bibliothèque de l'Observatoire dont il s'occupe justement à l'époque. Pourtant il écrit dans son mémoire de 1810 :

« Mes expériences étaient à peu près achevées, lorsque la lecture d'un de ses beaux Mémoires que le docteur Young a inséré dans les Transactions philosophiques m'apprit que M. Robisson [John Robison], professeur de physique à Edinburgh, avait considéré théoriquement cette question de la vitesse de la lumière ; j'ai depuis trouvé, dans différents ouvrages, qu'elle avait été examinée sous différents points de vue par Boscowich, Michell, Wilson et Blair⁶. »

Est-ce Laplace, et non Arago, qui avait lu Michell et avait suggéré cette démarche expérimentale^d ?

Mais revenons aux observations. Le prisme achromatique, qui donne une déviation d'un peu plus de 10° , est fixé devant l'objectif de la lunette d'un cercle méridien mural^e, ce qui fait que les étoiles sont observées à leur passage au méridien. Le prisme peut tourner sur lui-même et se déplacer latéralement. Arago fait des mesures, avec et sans prisme, de la distance angulaire au zénith de diverses étoiles au moment de leur passage au méridien (figure 4.3). Il répète ces mesures à différentes époques de l'année. Il trouve que les déviations par le prisme ainsi mesurées ne présentent que de très faibles différences d'une étoile à l'autre, qu'il attribue aux erreurs de mesure. Pour diminuer leur effet, il fait néanmoins construire un autre prisme semblable et recommence ses observations avec les deux prismes collés l'un à l'autre, obtenant ainsi une déviation totale de $22^\circ 25'$. Cette fois, cet ensemble est placé devant l'objectif d'un cercle répétiteur, probablement celui de Fortin qui se trouve actuellement dans les collections de

^d On attribue souvent à Laplace l'idée que le champ de gravitation de certaines étoiles pourrait ralentir leur lumière, voire l'empêcher de sortir, ce qui préfigure les trous noirs. Pourtant l'idée est bien de Michell ; Laplace, qui cite rarement ses sources, la lui a peut-être empruntée.

^e Probablement le grand quart de cercle du constructeur anglais John Bird.

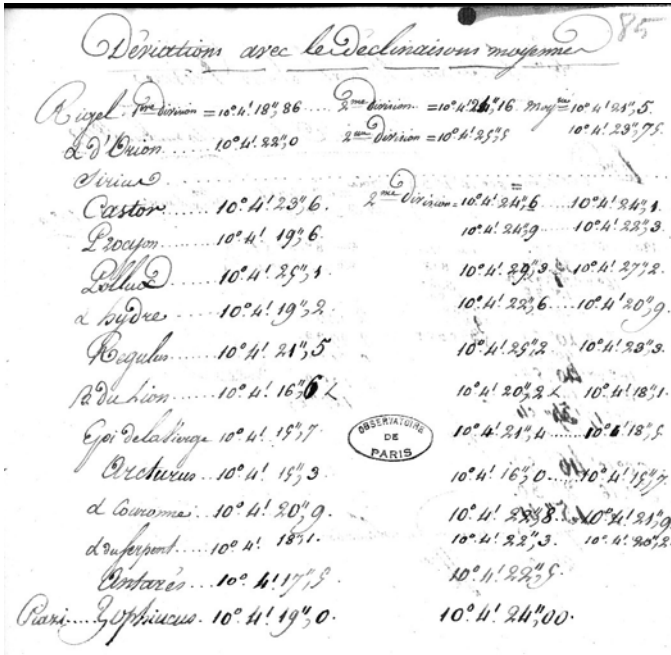


Figure 4.3. Page d'un cahier autographe d'Arago où il reporte le résultat final de ses premières mesures avec le prisme achromatique. Il y indique la différence de déclinaison de diverses étoiles mesurée avec et sans prisme avec les deux divisions opposées d'un cercle mural, puis leur moyenne, c'est-à-dire la déviation de ce prisme. On voit que les différences d'une étoile à l'autre ne sont que de quelques secondes de degré, dues seulement aux erreurs de mesure.

L'Observatoire de Paris et qu'Arago avait utilisé en Espagne (figure 4.4). Il n'occulte que la moitié de l'objectif de la lunette du cercle répétiteur, si bien qu'il suffit d'observer successivement la même étoile avec la partie non occultée puis à travers le prisme, et de lire sur le cercle gradué la différence des pointés de la lunette.

Cette fois encore, aucune différence significative n'est trouvée d'une étoile à l'autre. La vitesse de la lumière ne semble pas dépendre des propriétés de l'étoile émettrice. Par ailleurs, si la vitesse de la lumière s'était composée simplement avec celle de la Terre, Arago aurait pu détecter facilement l'effet de ce mouvement sur la vitesse de la lumière : il aurait produit à deux périodes opposées de l'année une déviation atteignant, pour les étoiles proches de l'écliptique, 6'' avec le prisme achromatique simple et de 14'' avec le prisme double. Il n'a rien observé de tel.

Arago et Laplace sont perplexes devant ces résultats. Ils hésitent entre deux explications : soit la théorie newtonienne est fautive et la vitesse de la lumière est constante, soit l'œil ne peut percevoir que des grains de lumière ayant une vitesse donnée. C'est la seconde hypothèse qu'il retient.

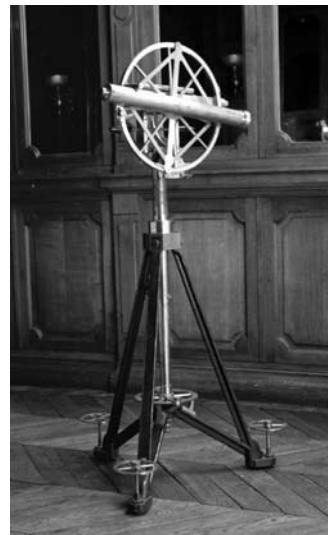


Figure 4.4. Le cercle répétiteur de Fortin de l'Observatoire de Paris.

Arago écrit en effet :

« Il semble [...] qu'on ne peut rendre raison [de l'observation] qu'en supposant que les corps lumineux émettent des rayons avec toutes sortes de vitesses, pourvu qu'on admette également que ces rayons ne sont visibles que lorsque leurs vitesses sont comprises entre des limites déterminées. Dans cette hypothèse, en effet, la visibilité des rayons dépendra de leurs vitesses relatives, et, comme ces mêmes vitesses déterminent la quantité de la réfraction, les rayons visibles seront toujours également réfractés. »

Ils en tirent une conséquence assez inattendue, mais qui montre qu'ils soupçonnent que les rayonnements infrarouge et ultraviolet sont de même nature que la lumière, ce qui est loin d'être évident à l'époque :

« Il ne sera peut-être pas inutile de noter que les observations dont je viens de rendre compte et la supposition qui les explique se lient d'une manière très-remarquable aux expériences de Herschel, Wollaston et Ritter. Le premier a trouvé, comme on sait, qu'il y a en dehors du spectre prismatique et du côté rouge, des rayons invisibles, mais qui possèdent à un plus haut degré que les rayons lumineux la propriété d'échauffer ; les deux autres physiciens ont reconnu, à peu près dans le même temps, que du côté du violet il y a des rayons invisibles et sans chaleur, mais dont l'action chimique sur le muriate [chlorure] d'argent et sur plusieurs autres substances est très-sensible [bien entendu, il s'agit respectivement de l'infrarouge et de l'ultraviolet]. Ces derniers rayons ne forment-ils pas la classe de ceux auxquels il ne manque qu'une petite augmentation de vitesse pour devenir visibles, et les rayons calorifiques ne seraient-ils pas ceux qu'une trop grande vitesse a déjà privés de la propriété d'éclairer ? »

Dans son grand ouvrage, *l'Exposition du Système du Monde*, Laplace reprend cette conclusion presque dans les mêmes termes⁷. Leur explication est pour le moins *ad hoc* : elle nous paraît aujourd'hui destinée à « sauver les meubles ». Laplace restera néanmoins convaincu de la validité de la théorie corpusculaire, car il écrit :

« Les phénomènes de la double réfraction et de l'aberration des étoiles, me paraissent donner au système de l'émission de la lumière, sinon une certitude entière, du moins un extrême probabilité. Ces phénomènes sont inexplicables dans l'hypothèse d'un fluide éthéré. »

Quoi qu'il en soit, les observations d'Arago ont jeté le trouble chez les partisans de la théorie newtonienne. Arago en fait encore partie, mais plus pour longtemps. Alexandre de Humboldt s'en est fait l'écho dans sa préface aux *Cœuvres complètes d'Arago*⁸ :

« Au moyen de l'application d'un prisme à l'objectif d'une lunette, [Arago] avait prouvé non-seulement que les mêmes tables de réfraction peuvent servir pour la lumière qui émane du Soleil et pour celle qui nous vient des étoiles [voici au moins une application pratique des observations d'Arago], mais en outre, ce qui jetait déjà bien des doutes sur la théorie de l'émission, que les rayons des étoiles vers lesquelles marche la terre, et les rayons des étoiles dont la terre s'éloigne, se réfractent exactement de la même quantité. Pour concilier ce résultat, obtenu à la suite d'observations très-déliçates, avec l'hypothèse newtonienne, il aurait fallu admettre que les corps lumineux émettent des rayons de toutes les vitesses, et que les seuls rayons d'une vitesse déterminée sont visibles, qu'eux seuls produisent dans l'œil la sensation de lumière. »

Arago mentionne d'autres propositions d'expériences liées à l'aberration destinées à rechercher des différences dans la vitesse de la lumière, qui consistent à observer la position des étoiles avec une lunette remplie d'eau. Dues à Rudjer Boscowich, puis à Alexander Wilson, et reprises encore dans la seconde moitié du XIX^e siècle par l'astronome anglais Airy et par d'autres encore, elles n'ont pas plus abouti que les siennes.

L'intervention de Fresnel

Perturbé par son résultat, Arago, qui est de plus en plus persuadé de la validité de la théorie ondulatoire, se tourne vers son ami Fresnel pour lui demander d'essayer d'interpréter ses observations dans le cadre de cette théorie. Fresnel se met à la tâche ; il écrit le 5 septembre 1818 à son frère Léonor :

« J'ai fait dernièrement un petit travail auquel j'attache quelque importance. J'ai prouvé qu'en supposant la terre assez poreuse pour qu'elle n'imprime à l'éther qui la pénètre et l'environne qu'une très-petite partie de sa vitesse, qui n'excédât pas un centième, par exemple, on pourrait expliquer d'une manière satisfaisante, non seulement l'aberration des

étoiles, mais encore tous les autres phénomènes d'optique compliqués du mouvement terrestre. »

Le travail de Fresnel est publié en 1818 dans les *Annales de Chimie et de Physique*⁹ sous la forme d'une lettre à Arago. La démonstration de Fresnel est subtile et plutôt alambiquée, et la figure reproduite dans ses *Œuvres complètes* est fautive. Mais cette démonstration a été bien analysée par Pierre Costabel¹⁰ (Encadré 4.1 et figure 4.5). Fresnel comprend que la vitesse de la lumière dans le prisme d'Arago ne s'additionne pas simplement avec la vitesse u de la Terre : ceci préfigure dans une certaine mesure la relativité restreinte. Il exprime ceci en disant que l'éther dans le prisme en mouvement n'acquiert pas la vitesse u , mais n'y est entraîné que partiellement avec la vitesse $u(1-1/n^2)$, n étant l'indice de réfraction du verre du prisme.

Mais Arago cesse vite de s'intéresser au problème, car il est engagé dans des travaux avec Ampère concernant l'électromagnétisme. On se serait attendu à ce qu'il en ait dit quelques mots en présentant en 1853 son article de 1810, mais il n'en est rien. L'hypothèse de l'« entraînement partiel » de l'éther aurait été complètement oubliée si Fizeau n'avait fait allusion au texte de Fresnel à propos de l'expérience dont nous allons parler.

Encadré 4.1. L'interprétation par Fresnel de l'observation d'Arago

Rappelons-nous qu'au XIX^e siècle, la lumière est censée se propager dans un éther qui remplit tout l'Univers et qui constitue le référentiel absolu que Newton avait proposé, par rapport auquel se déplace la Terre. Voici le raisonnement de Fresnel : supposons (figure 4.5) que la lumière arrive de la gauche en provenance d'un astre dont la Terre, donc le prisme d'Arago, s'éloigne avec la vitesse u . Elle entre dans le prisme perpendiculairement à une face avec la vitesse v . À l'intérieur du prisme, la lumière se propagerait à une vitesse v/n , n étant l'indice de réfraction du verre, si le prisme était immobile par rapport à l'éther ; mais cette vitesse pourrait être un peu différente en raison du mouvement du prisme (c'est ce que Fresnel cherche à connaître). À la sortie, le faisceau est dévié par le prisme dans la direction H , et se propage à

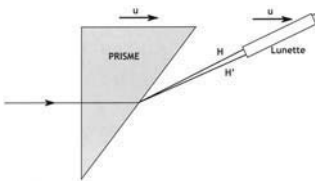


Figure 4.5. L'interprétation de Fresnel.

nouveau dans l'éther immobile. Comme la lunette qui sert à l'observer se déplace par rapport à cet éther avec la vitesse u pendant le temps de trajet depuis la sortie du prisme, on ne voit pas le faisceau exactement dans la direction \mathbf{H} , mais dans une direction voisine \mathbf{H}' : c'est l'aberration (qui ne dépend pas de la distance prisme-lunette). Puisque Arago observe toujours la même déviation par le prisme quelle que soit la vitesse u , c'est que la lumière ne se propage pas à l'intérieur avec la vitesse v/n , mais avec une vitesse légèrement différente, ce qui modifie la déviation de la lumière par ce prisme de façon à compenser l'aberration. Fresnel interprète ceci par un « *entraînement partiel* » de l'éther à l'intérieur du prisme à une vitesse beaucoup plus lente que u . Le calcul donne la formule indiquée dans le texte ; la vitesse v s'élimine dans ce calcul, si bien qu'il aurait été impossible de toute façon à Arago de voir un changement éventuel de la vitesse de la lumière. Dans l'interprétation moderne, quel que soit le mouvement de la Terre la lumière entre dans le prisme avec la vitesse invariable c , qui ne dépend pas de u , et la vitesse dans le prisme est toujours c/n .

L'expérience de Fizeau

Encadré 4.2. Hippolyte Fizeau

Fizeau, né à Suresnes dans un milieu aisé, suivit des études de médecine tout en faisant à ses heures de loisir des expériences de physique, pour laquelle il abandonna finalement la médecine. Il travailla alors seul ou avec Léon Foucault à l'amélioration du daguerréotype et à son utilisation pour l'astronomie, à la photométrie, aux interférences de la lumière, etc. Il découvrit le décalage de la fréquence de la lumière reçue d'une source en mouvement (l'autrichien Christian Doppler l'avait de son côté découvert pour les ondes sonores), mesura pour la première fois en 1849 la vitesse de la lumière, et réalisa différentes expériences d'optique restées célèbres. Il eut une grande influence sur la physique de son temps.

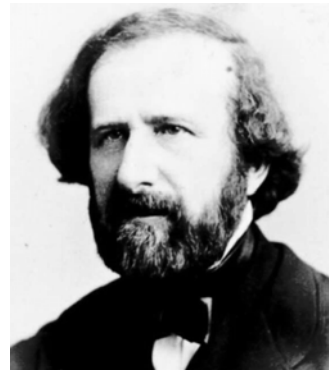


Figure 4.6. Hippolyte Fizeau (1819-1896).

Hippolyte Fizeau (figure 4.6 ; encadré 4.2), qui avait suivi les cours d'Arago à l'Observatoire de Paris, s'intéresse aussi à la vitesse de la lumière, dont il réalise la première mesure directe en 1849. En 1851, il entreprend, peut-être poussé par Arago, de vérifier les idées de Fresnel dont nous venons de parler par une nouvelle expérience très ingénieuse. Il écrit, dans l'introduction de l'article qui décrit cette expérience¹¹ :

« Plusieurs théories ont été proposées pour rendre compte du phénomène de l'aberration dans le système des ondulations [souvenons-nous que la démonstration de Fresnel fait appel à l'aberration : voir l'encadré 4.1]. Fresnel d'abord, et plus récemment MM. Doppler, Stokes, Challis, et plusieurs autres, ont publié des travaux importants sur ce sujet. Mais il ne paraît pas qu'aucune des théories proposées ait reçu l'assentiment complet des physiciens. »

Fizeau rappelle ensuite l'hypothèse de Fresnel sur l'entraînement partiel de l'éther par les corps en mouvement, et l'explique très clairement comme suit :

« Si l'on suppose que l'éther est entraîné en totalité avec le corps, la vitesse de la lumière [dans ce corps] devra être augmentée de toute la vitesse du corps, le rayon étant supposé dirigé dans le sens du mouvement.

« Si l'éther est supposé libre, la vitesse de la lumière ne sera nullement altérée.

« Enfin si une partie seulement de l'éther est entraînée, la vitesse de la lumière sera augmentée, mais d'une fraction seulement de la vitesse du corps, et non pas de la totalité, comme dans la première hypothèse. Cette conséquence n'est pas aussi évidente que les précédentes, mais Fresnel a fait voir qu'elle est appuyée par des considérations mécaniques très-probables.

Puis il explique les prémisses de son expérience :

« On doit à M. Arago une méthode fondée sur le phénomène des interférences, et qui est propre à mettre en évidence les plus petites variations dans les indices de réfraction des corps [nous en reparlerons au chapitre 10]. Les observations de MM. Arago et Fresnel, sur la différence de réfraction qui existe entre l'air sec et l'air humide, ont montré la sensibilité extraordinaire de ce moyen d'observation.

« C'est en adoptant le même principe et joignant le double tube de M. Arago à l'appareil des deux lunettes conjuguées

que j'avais employé pour une détermination de la vitesse absolue de la lumière, que j'ai pu étudier directement dans deux milieux, l'air et l'eau, les effets du mouvement d'un corps sur la lumière qui le traverse. »

La figure 4.7 montre le principe de l'expérience, qui a réutilisé les deux lunettes avec lesquelles Fizeau avait mesuré la vitesse de la lumière deux ans auparavant. La lumière arrivant du Soleil via un héliostat (soit l'héliostat de Gambey de l'Observatoire, figure 4.8, soit un héliostat de Silbermann, figure 4.9) est concentrée par une lentille cylindrique sur une fente située au foyer d'une lunette. Celle-ci en produit donc un faisceau parallèle devant son objectif. On place devant l'objectif deux fentes. La lumière issue de chacune de ces fentes parcourt un tube de 1,5 m de long rempli d'eau, puis parvient à une autre lunette munie d'un miroir. Cette lunette renvoie la lumière qui lui parvient d'un des tubes dans l'autre tube, si bien qu'avec le sens indiqué de circulation de l'eau les effets s'ajoutent. Les deux faisceaux lumineux ainsi renvoyés repassent dans les deux fentes, retombent dans la

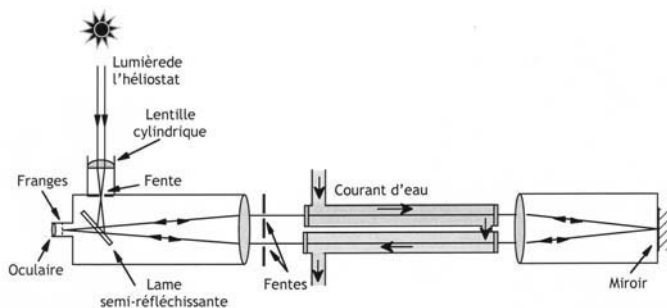


Figure 4.7. L'expérience de Fizeau. Explications dans le texte.

lunette et interfèrent à son foyer. On observe avec l'oculaire les franges d'interférence ainsi formées.

Faisant circuler l'eau en série dans les tubes avec une vitesse de 7 mètres par seconde, Fizeau observe un déplacement de 0,23 frange. Le calcul d'entraînement partiel de la lumière par l'eau, adapté de Fresnel, prévoyant 0,20 frange, au lieu de 0,40 frange s'il y avait entraînement



Figure 4.8. Un héliostat de Gambey (1823). Un miroir (en haut, ici recouvert d'un couvercle protecteur), mû par un mécanisme d'horlogerie visible dans la boîte ronde, envoie la lumière du Soleil dans une direction fixe.

total, Fizeau conclut que Fresnel avait raison^f. Remplaçant l'eau par l'air, animé cette fois d'une vitesse de 25 mètres par seconde, Fizeau ne voit aucun déplacement appréciable : or le calcul de Fresnel prévoit un déplacement non mesurable de 0,00023 frange, contre 0,41 frange si l'entraînement était total. Ici encore, Fresnel avait raison, ou du moins sa formule était exacte. Mais Fizeau n'est pas entièrement convaincu. Il écrit en conclusion de son article :

« Le succès de cette expérience me semble devoir entraîner l'adoption de l'hypothèse de Fresnel, ou du moins de la loi qu'il a trouvée pour exprimer le changement de la vitesse de la lumière par l'effet du mouvement des corps ; car bien que cette loi se trouvant véritable [lire : vérifiée], cela soit une preuve très-forte en faveur de l'hypothèse dont elle n'est qu'une conséquence, peut-être la conception de Fresnel paraîtra si extraordinaire, et, sous quelques rapports, difficile à admettre, que l'on exigera d'autres preuves encore, et un examen approfondi de la part des géomètres [lire : théoriciens], avant de l'adopter comme expression de la réalité des choses. »

Fizeau a bien raison d'être sceptique !

L'interprétation moderne des expériences d'Arago et de Fizeau

L'expérience de Fizeau a été refaite plusieurs fois par la suite avec des résultats concordants, notamment par Albert A. Michelson et Edward W. Morley qui ont vérifié l'effet avec une grande précision¹². Michelson et Morley ont par ailleurs réalisé en 1881, puis repris en 1887 « avec un appareil gigantesque », la célèbre expérience par laquelle ils ont montré qu'il était impossible de détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'éther¹³. Souvenons-nous encore que l'éther était censé, depuis Newton, être un repère absolu pour les mouvements, ce que personne ne mettait en doute. Le physicien français Eleuthère Mascart écrit en 1893 dans son remarquable *Traité d'optique*, qui

^f On remarquera une différence fondamentale entre l'observation d'Arago (figure 4.5) et l'expérience de Fizeau : dans cette dernière, le milieu réfringent est en mouvement par rapport à l'observateur, tandis que chez Arago l'observateur est fixe par rapport au milieu réfringent qu'est le verre du prisme.

contient une foule de renseignements intéressants sur l'optique au XIX^e siècle¹⁴ :

« Il semble résulter de toutes ces expériences [...] que les phénomènes optiques sont impuissants à mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre, par des observations qui n'empruntent pas la lumière des astres, et que finalement les mouvements relatifs sont seuls appréciables. »

La théorie de la relativité restreinte est en germe : son établissement sera un processus graduel auquel ont participé Hendrik Antoon Lorentz, Henri Poincaré, et évidemment Albert Einstein qui sera le seul à franchir la dernière étape, c'est à dire à accepter pleinement le bouleversement qu'elle implique des concepts d'espace et de temps¹⁵. Son postulat fondamental est que la vitesse de la lumière dans le vide est une constante universelle, désignée par la lettre c . C'est seulement alors que l'on comprend que l'éther n'existe pas, qu'il n'y a pas de repère absolu, et que la lumière peut se propager dans un vide réel, ce que n'avait osé envisager aucun physicien du XIX^e siècle, même Maxwell, qui avait pourtant établi la théorie électromagnétique de la lumière.

Il est facile d'interpréter les expériences d'Arago et de Fizeau dans le cadre de la relativité restreinte.

Tout d'abord il est clair qu'Arago ne pouvait voir aucune variation de la déviation de ses prismes. En effet, la lumière y arrive avec la même vitesse c quelle que soit sa source et quel que soit le déplacement de celle-ci par rapport à la Terre. Ce qui se passe après est donc indépendant de la source et de sa vitesse⁸. Même si l'étoile visée a un champ de gravitation considérable, cela déforme l'espace autour d'elle sans changer la vitesse de la lumière qu'elle émet ; mais la longueur d'onde est décalée vers le rouge pour un observateur extérieur. Ce décalage spectral n'a été observé pour la première fois de façon convaincante qu'en 1967 sur le rayonnement des étoiles naines blanches, bien après qu'Einstein ait formulé la théorie de la relativité générale.

Pour la même raison, Michelson et Morley ne pouvaient pas non plus détecter de changement de la vitesse

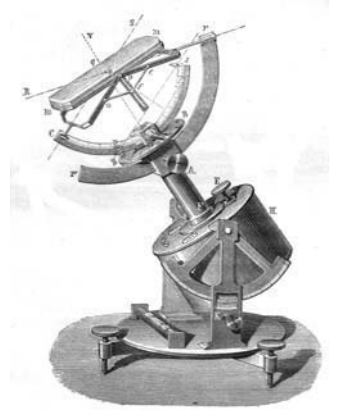


Figure 4.9. Un héliostat de Silbermann (milieu du XIX^e siècle). Plus simple que celui de Gambey (figure 4.8), l'héliostat de Silbermann a été très utilisé comme source de lumière pour les expériences d'optique et les agrandissements photographiques jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

⁸ En toute rigueur, la lumière arrive avec une vitesse très légèrement inférieure puisque le prisme est dans l'air ; mais cette vitesse ne dépend toujours pas de la source et de son mouvement.

de la lumière en faisant varier l'orientation de leur appareil par rapport au déplacement de la Terre.

L'expérience de Fizeau est plus subtile : en effet, la lumière a une vitesse dans l'eau inférieure à c , et sa vitesse peut se composer avec la vitesse de l'eau, mais sans s'ajouter simplement. Un calcul relativiste montre que si v est la vitesse de la lumière dans l'eau immobile par rapport à l'observateur ($v = c/n$ où n est l'indice de réfraction de l'eau), et que si l'eau se déplace maintenant par rapport à l'observateur dans la direction de la lumière avec la vitesse u , la vitesse résultante V de la lumière est pour cet observateur :

$$V = (v + u)/(1 + uv/c^2)$$

On peut vérifier que V est égal à c quel que soit u si $v = c$, c'est-à-dire dans le vide, ou en première approximation dans l'air. La formule donnée par Fresnel et Fizeau, qui suit, est en accord au premier ordre en u/c avec la formule relativiste, u étant beaucoup plus petit que v et c :

$$V \approx v + u(1 - 1/n^2) = v + u(1 - v^2/c^2),$$

alors que si les vitesses s'étaient simplement additionnées comme en mécanique newtonienne, on aurait eu

$$V = v + u,$$

ce qui est très différent. Dans la version de l'expérience de Fizeau dans laquelle l'eau est remplacée par l'air, la différence entre la formule relativiste et la formule newtonienne est encore plus grande, car v est à peine inférieur à c , et donc également à V en mécanique relativiste.

Ces résultats nous paraissent simples, mais nous avons vu combien le cheminement de la pensée pour y parvenir a été long et tortueux.

L' « expérience cruciale » d'Arago

Malgré l'évidence, les partisans de la théorie corpusculaire de la lumière n'ont pas baissé les bras. De son poste de secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, Arago est bien placé pour s'en rendre compte, et il doit en souffrir particulièrement. Par exemple, Biot croit encore en 1839 à l'interprétation qu'avaient donné initialement Arago et Laplace des observations de 1809-1810¹⁶. Comme Arago n'est pas homme à désarmer, et bien que

ses activités politiques et administratives lui laissent de moins en moins de temps pour faire de la recherche, il se lance dans une « *expérience cruciale* » destinée à confondre les partisans de la théorie newtonienne de la lumière : la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. L'histoire de cette expérience est bien connue, grâce en particulier à William Tobin¹⁷, aussi nous bornerons-nous ici à un bref résumé.



Figure 4.10. Charles Wheatstone (1802-1875).

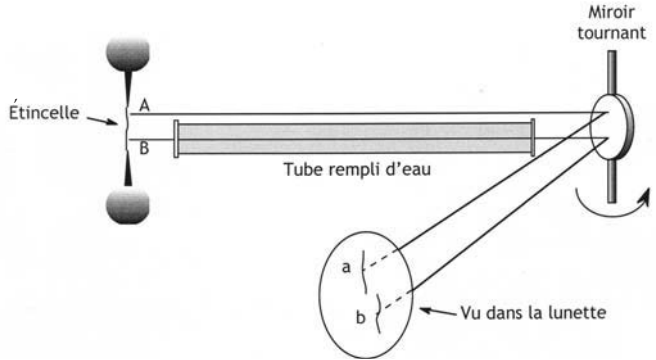
Le miroir tournant

La lumière se propageant très rapidement, Arago doit disposer d'un moyen de mettre en évidence et éventuellement de mesurer des phénomènes extrêmement rapides. En 1834, lors d'un voyage en Grande Bretagne, il a entendu parler d'un appareil construit la même année par le physicien anglais Charles Wheatstone (figure 4.10) en vue de mesurer la « *vitesse de l'électricité* »¹⁸. Wheatstone y amène l'une au dessus de l'autre deux étincelles produites aux deux extrémités d'un long conducteur double, alimenté à l'une de ces extrémités par une machine électrostatique. Il les examine par réflexion sur un miroir tournant très rapidement : si l'étincelle de l'extrémité éloignée avait été en retard sur l'autre, il l'aurait vue décalée angulairement, le miroir ayant un peu tourné dans l'intervalle. Wheatstone voit effectivement un décalage très faible et en déduit que la propagation de l'électricité est très rapide^h. Sa méthode est astucieuse, et Arago se propose en 1838, lorsqu'il présente Wheatstone pour une place de correspondant à l'Académie des sciences, de l'utiliser pour sa propre expérience¹⁹.

Il imagine de faire une longue étincelle, dont Wheatstone a montré qu'elle dure très peu de temps (figure 4.11). La lumière issue de la partie basse de l'étincelle passerait dans un tube plein d'eau tandis que celle de la partie haute passerait dans l'air. Les deux rayons arriveraient alors sur un miroir tournant autour d'un axe vertical, et le plus lent d'entre eux, qui arriverait plus

^h Wheatstone avait cru mesurer 460 000 km/s ! Les mesures ont été reprises par Fizeau et Gounelle (1850, *CRAS* 30, p. 437-440) en utilisant les conducteurs du télégraphe électrique de Paris à Rouen et de Paris à Amiens ; leur méthode, dérivée de la roue dentée de Fizeau, donne des vitesses plus raisonnables comprises entre 100 000 et 180 000 km/s.

Figure 4.11. Le projet d'Arago pour comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. Explications dans le texte.



tard sur le miroir, serait réfléchi d'un angle plus grand. On aurait regardé ces rayons réfléchis avec une lunette, et on aurait vu lequel aurait mis le plus de temps à parvenir au miroir. Arago estime qu'un tube plein d'eau de 14 mètres de long devrait convenir si le miroir tourne à 1 000 tours par seconde, ce qui donnerait une différence d'une demi-minute de degré entre les deux rayons réfléchis (figure 4.12).

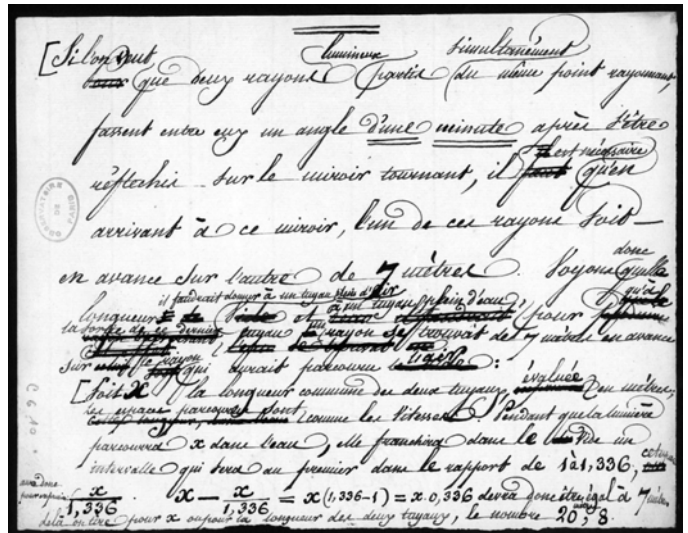


Figure 4.12. Brouillon autographe d'Arago contenant des calculs préparatoires à l'expérience de comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau.

Pour augmenter les chances de voir l'étincelle, Arago propose de disposer des observateurs, munis chacun d'une lunette, tout autour du miroir tournant et de

mettre 8 à 10 miroirs au lieu d'un seul sur le support rotatif. Il imagine aussi d'utiliser au lieu d'eau du « *carbure de soufre* » CS_2 , qui a un indice de réfraction très élevé et disperse fortement la lumière ; on aurait alors observé un spectre, et il aurait suffi de voir dans quel ordre les couleurs se succèdent pour résoudre le problème. Devenu responsable de l'Observatoire et disposant sans doute ainsi de ressources accrues, il fait construire en 1843 plusieurs miroirs tournants par Louis Breguet, petit-fils du célèbre horloger Abraham Breguet, qui a diversifié l'activité familiale pour construire toutes sortes d'instruments de physique. Un de ces instruments subsiste à l'Observatoire, dont le miroir unique peut tourner à 2 000 ou 3 000 tours par seconde. Malgré de nombreux essais, Arago n'obtient aucun résultat et finalement, alors qu'il ressent déjà fortement les atteintes du diabète et que sa vue diminue, abandonne cette recherche.

Fizeau et Foucault reprennent le flambeau

Fizeau et Foucault sont depuis quelque temps des familiers de l'Observatoire et connaissent bien Arago. Il est naturel qu'ils reprennent l'expérience abandonnée par celui-ci. Fizeau dit que Foucault a eu l'idée de renvoyer sur le miroir tournant la lumière réfléchi par celui-ci grâce à un miroir plan, ce qui évite la couronne d'observateurs ; finalement Foucault et Arago se sont accordés pour affirmer que l'idée venait de l'astronome allemand Friedrich Wilhelm Bessel. De toute façon, ce n'était pas une bonne idée, car le miroir plan ne renvoie la lumière sur le miroir tournant que pendant le très court instant où le faisceau tombe perpendiculairement à sa surface, et la lumière est perdue le reste du temps. Aussi Fizeau et Foucault abandonnent-ils, eux aussi, la partie.

Ce n'est que provisoire. Sans doute en 1849, après avoir fait la première mesure directe de la vitesse de la lumière, Fizeau réalise que si l'on remplace le miroir plan de renvoi par un miroir concave, le faisceau revient sur le miroir tournant pendant tout le temps où il atteint le miroir concave, et l'on gagne beaucoup en luminosité. C'est alors que Fizeau et Foucault, qui avaient beaucoup collaboré jusque-là, se séparent et tentent l'expérience chacun de leur côté. Fizeau, qui a la faveur d'Arago, monte la sienne dans la salle de la méridienne de

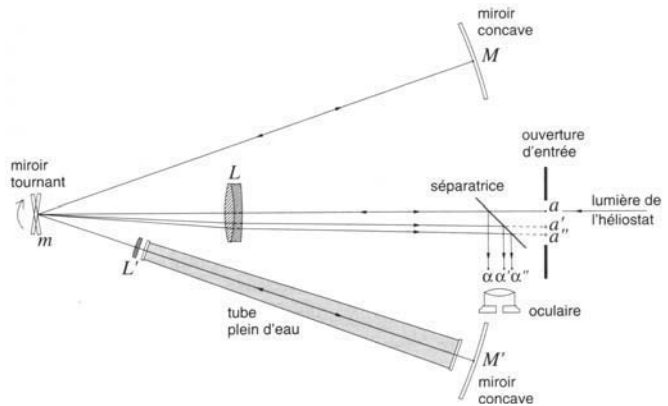


Figure 4.13. Léon Foucault (1819-1868).

l'Observatoire (aujourd'hui salle Cassini) en utilisant un des miroirs tournants de Breguet. Foucault (figure 4.13), quant à lui, travaille dans sa maison de la rue d'Assas avec un miroir tournant entraîné par une petite turbine à vapeur, qu'il a fait construire par Gustave Froment. Les deux montages sont très semblables (figure 4.14). Ils utilisent tous les deux le soleil comme source de lumière, grâce à un héliostat (voir les figure 4.8 et 4.9), car aucune autre source n'est assez puissante pour l'expérience, qui demande beaucoup de lumière.

Il faut donc qu'il fasse beau. Or il fait au printemps 1850 un temps exécrable. Finalement, profitant d'une des rares éclaircies, c'est Foucault qui gagne la course le 27 avril²⁰, tandis que Fizeau et Breguet, qui étaient presque prêts, doivent attendre le 17 juin pour annoncer leur réussite²¹. Les résultats sont en accord : la lumière va plus vite dans l'air que dans l'eau. La théorie corpusculaire a vécu.

Figure 4.14. Le dispositif de Foucault pour comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. Le tube plein d'eau avait 3 m de long. Un fil est placé en a . Les miroirs concaves et les lentilles en font l'image dans le même plan lorsque le miroir tournant a la position appropriée. Lorsque ce miroir tourne lentement, les faisceaux sont renvoyés sur eux-mêmes en a . Lorsque la rotation du miroir est très rapide, il a le temps de tourner légèrement pendant le temps de trajet aller-retour de la lumière jusqu'aux miroirs concaves, et les images de a sont déviées en a' (à travers l'air) et en a'' (à travers l'eau). Ces images sont reprises par une lame séparatrice semi-transparente ce qui donne les images α , α' et α'' , que l'on regarde dans l'oculaire.



Problèmes de déontologie

Il est probable qu'Arago ait été quelque peu fâché de la façon dont les choses se sont passées. Si à l'heure actuelle la déontologie des chercheurs considère comme normale la possibilité de travailler sur une idée émise publiquement par d'autres scientifiques, ce n'était certainement pas l'opinion d'Arago. Ce dernier a pris soin de préciser son point de vue dans une note où il décrit ses projets de comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau²². Il mentionne que Wheatstone a songé dès avant

1835 à cette comparaison et aussi à la mesure absolue de la vitesse de la lumière, mais n'a rien publié, si bien que

« comme cette pensée n'avait reçu aucune publication, elle était pour tout le monde comme non avenue : la publication est le seul moyen d'établir en ce genre la priorité ».

Arago se considère donc comme propriétaire de l'idée. Il ajoute :

« La publicité donnée à mon système d'observation a dû être considérée par M. Wheatstone lui-même comme une raison de s'abstenir. En effet, il n'a pas fait l'expérience, quoiqu'il eût les appareils nécessaires pour cela. »

Il mentionne aussi que

« M. Bessel, après ma publication dans le Compte Rendu, m'annonça qu'il avait songé à une modification de mon appareil [l'utilisation d'un miroir plan de renvoi].[...] En me communiquant son système, l'illustre astronome de Königsberg ajoutait ces mots : « Quoique mon procédé me paraisse plus simple, comme il n'est qu'une modification du vôtre, je ne l'essaierai pas : l'idée de l'expérience vous appartient ; vous avez démontré la possibilité de sa réalisation ; aussi le résultat, quel qu'il soit, vous appartiendra. »

Arago ajoute :

« Les choses étaient dans cet état, lorsque M. Fizeau détermina, par une expérience si ingénieuse, la vitesse de la lumière dans l'atmosphère. Cette expérience n'étant pas indiquée dans mon Mémoire, l'auteur avait donc le droit de la faire sans s'exposer au plus léger reproche d'indélicatesse.

« Quant à l'expérience de la vitesse comparée de la lumière dans un liquide et dans l'air, l'auteur m'écrivait : « Je n'ai fait encore aucun essai dans ce sens, et je ne m'en occuperai que sur votre invitation formelle. » Cette réserve loyale ne pouvait qu'ajouter à l'estime que le caractère et les travaux de M. Fizeau m'ont inspirée, et je me suis empressé d'autoriser M. Breguet à lui prêter un ou plusieurs de mes miroirs rotatifs.

« M. Foucault, dont l'Académie connaît l'esprit inventif, est venu lui-même me faire part du désir qu'il avait de soumettre à l'épreuve de l'expérience une modification qu'il voulait apporter à mes appareils.

« Je ne puis, dans l'état actuel de ma vue, qu'accompagner de mes vœux les expérimentateurs qui veulent suivre mes idées. »

Ainsi Arago a donné à Fizeau la permission explicite de réaliser l'expérience. Bien que Foucault ait eu, selon son ami le physicien Jules Lissajous « *l'extrême délicatesse d'aller demander à Arago une autorisation que celui-ci ne pouvait guère lui refuser,* »²³ Arago n'a pas dû vraiment apprécier, bien que Lissajous ait ajouté : « [L'autorisation] *lui fut accordée avec tant de bonne grâce, qu'on ne sait ce qu'on doit le plus admirer de la déférence modeste du jeune savant ou de la noble condescendance du vieillard.* » Foucault s'en est certainement rendu compte, car il remercie Arago avec une flagornerie inhabituelle à la fin de sa communication à l'Académie des sciences²⁴ :

« Si les physiciens accueillent favorablement le fruit de mes premiers travaux, que tout l'honneur en revienne à M. Arago qui, dans une pensée d'une hardiesse admirable, a montré que les questions relatives à la vitesse de la lumière devaient passer du domaine de l'astronomie dans celui de la physique, et qui, par une généreuse abnégation, a permis aux jeunes savants de se lancer avec ardeur dans la voie qu'il leur a tracée. »

La mesure directe de la vitesse de la lumière

Les expériences dont nous venons de parler n'avaient pas pour but de mesurer de façon absolue la vitesse de la lumière, mais simplement de comparer cette vitesse dans des milieux différents. Cependant la valeur de la vitesse de la lumière avait vers 1850 un intérêt en soi, comme nous allons le voir.

Les précurseurs

Depuis l'antiquité et jusqu'au xvii^e siècle, une sorte de « *pensée unique* » admet une propagation instantanée de la lumière. Galilée est l'un des premiers à mettre en doute cette opinion. Il essaye, semble-t-il pour la première fois, de mesurer la vitesse de la lumière par une expérience nocturne célèbre²⁵. Il découvre une lanterne allumée. Un aide, situé à une assez grande distance et muni lui aussi d'une lanterne, la découvre au moment où il voit la lanterne de Galilée. Celui-ci note le temps écoulé entre

le moment où il a découvert sa lanterne et celui où il voit celle de l'aide. Si la vitesse de la lumière avait par exemple été voisine de celle du son, soit 340 mètres par seconde, l'expérience aurait donné un résultat. Mais évidemment la lumière va trop vite pour qu'elle réussisse.

Le mérite d'avoir montré que la vitesse de la lumière n'est pas infinie revient à Jean-Dominique Cassini (figure 4.15), le responsable de l'Observatoire de Paris, et à Ole (ou Olaus) Rømer (ou Roemer, ou Römer, figure 4.16), astronome danois qui travaille dans cet Observatoire. Dans le but de prévoir les éclipses des satellites de Jupiter, dont l'observation doit permettre de synchroniser les horloges en différents lieux et donc de déterminer les longitudes, Cassini avait établi un programme systématique d'observations de ces satellites lorsqu'il était encore en Italie (il arrive à Paris en 1669). À l'Observatoire, ces observations sont faites par Jean Picard et d'autres. Cassini constate que les éclipses par la planète du premier satellite, Io, paraissent en retard par rapport aux éphémérides qu'il a calculées lorsque la Terre est très éloignée de Jupiter, et en avance lorsqu'elle en est proche. Il comprend, et Rømer à sa suite, que ceci peut être dû au fait que la lumière ne se propage pas instantanément, et qu'elle met donc plus longtemps à nous parvenir de Jupiter lorsqu'il est éloigné que lorsqu'il est proche de nous (figure 4.17). Cette explication capitale date de 1676. Cassini aura plus tard des doutes sur cette hypothèse, car les autres satellites de Jupiter ne paraissent pas s'y conformer : leur mouvement est très complexe en raison de leurs interactions gravitationnelles mutuelles, ce que Cassini ne peut pas savoir. Mais Rømer s'en fait le porte-parole en dépit de l'opposition de Cassini, si bien que l'on ne se souviendra que de lui. Cette explication sera acceptée sans problème par Huygens et par Newton.

Cassini estime à 10 ou 11 minutes le temps mis par la lumière à aller du Soleil à la Terre ; mais ni lui ni Rømer ne cherchent à connaître la valeur numérique de la vitesse de la lumièreⁱ. Il leur suffit sans doute de savoir qu'elle est très



Figure 4.15. Jean-Dominique Cassini (Cassini I) (1625-1712).



Figure 4.16. Ole Rømer (1644-1710).

ⁱ Cependant de nombreux traités de physique, et non des moindres, donnent des valeurs de la vitesse de la lumière attribuées à Rømer, évidemment différentes les unes des autres, et des dates souvent fausses pour la découverte de la nature finie de la vitesse de la lumière : voir Wróblewski A. (1985) *American Journal of Physics* 53, p. 620-630.

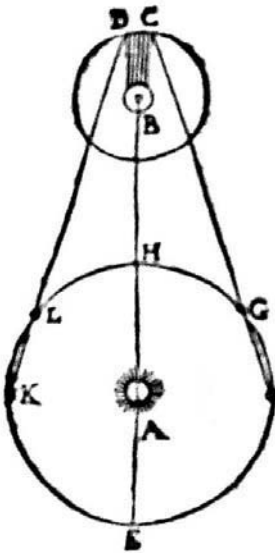


Figure 4.17. Explication par Rømer des anomalies apparentes du mouvement de Io, le premier satellite de Jupiter. On voit en haut du schéma Jupiter et l'orbite de Io, et en bas le Soleil et l'orbite de la Terre. Entre deux émersions (sorties) successives d'Io de l'ombre de Jupiter, la Terre s'est déplacée de L à K sur son orbite, si bien que la deuxième émergence paraît en retard de plusieurs minutes puisque la Terre s'est éloignée de Jupiter ; ce retard est le temps mis par la lumière pour parcourir LK.

grande. Néanmoins Huygens calculera cette vitesse : son calcul est reproduit dans son *Traité de la lumière*. Il utilise la distance entre le Soleil et la Terre, alors supposée assez mal connue et estimée à 12 000 fois le diamètre de la Terre (la valeur exacte est 11 750), et la divise par le temps de propagation ci-dessus. Il trouve environ 230 000 kilomètres par seconde (en unités modernes), affirmant que « la vitesse de la lumière est plus de 600 000 fois plus grande que celle du son », en fait 660 000 fois avec ses données. Evidemment la précision est médiocre et le résultat est trop faible de plus de 20 %.

La découverte de l'aberration par Bradley en 1728 va permettre un nouveau progrès²⁶. Nous avons vu que l'aberration, c'est à dire le déplacement apparent maximum des étoiles dans le ciel au cours de l'année, est si on l'exprime en radians le rapport entre la vitesse de la Terre sur son orbite et la vitesse de la lumière. Bradley estime ainsi que la lumière va 10 210 fois plus vite que la Terre, et en conséquence que le temps mis par la lumière pour parcourir le rayon de l'orbite terrestre est $3,16 \cdot 10^7 / (10\,210 \times 2\pi) = 492$ secondes, soit 8 minutes 12 secondes ($3,16 \cdot 10^7$ est le nombre de secondes dans une année). C'est un très bon résultat, proche de la valeur moderne de 8 minutes 19,0 secondes¹. Mais le rayon de l'orbite terrestre est toujours considéré comme mal connu, et Bradley se garde donc, comme ses prédécesseurs à l'exception de Huygens, de donner une valeur pour cette vitesse.

Plus tard, des progrès sont accomplis dans la connaissance du temps de trajet de la lumière du Soleil à la Terre, toujours par l'observation des satellites de Jupiter : Delambre donne, en 1817, 8 minutes 13,20 secondes pour ce temps de trajet à partir de l'observation de plus de 1000 éclipses de ces satellites²⁷. Mais en 1843, cette valeur paraît dépassée par celle obtenue par Wilhelm Struve à partir d'une détermination très précise de la constante de l'aberration, soit 8 minutes 17,8 secondes. La connaissance de la distance de la Terre au Soleil s'est également quelque peu améliorée grâce aux observations des passages de Vénus devant le Soleil en 1761 et 1769, discutées par Johann Franz Encke. Mettant tout ensemble, Arago annonce dans son *Astronomie populaire* une vitesse de la

¹ Tout aussi intéressant est le fait que l'aberration a éliminé définitivement le modèle géocentrique du système solaire, dans lequel la Terre était immobile.

lumière dans le vide de 77 076 lieues par seconde, soit 308 300 kilomètres par seconde. Comme cet ouvrage posthume est basé sur les cours qu'Arago a donnés de 1813 à 1846, il est difficile de savoir à quelle date il a estimé cette vitesse.

La roue dentée de Fizeau

On ne sait pas ce qui a incité Fizeau à entreprendre sa mesure de la vitesse de la lumière. Il est bien sûr intéressé par la lumière en général, et il a été peut-être poussé par Arago. Quoi qu'il en soit, il fait construire par Froment, sans doute à ses frais, l'appareil représenté figure 4.18^k, avec lequel il fait la première mesure directe de la vitesse de la lumière en juillet 1849²⁸.

La figure 4.19 est un schéma de principe de cet appareil. La figure 4.20 montre ce que voit Fizeau dans l'oculaire. La grande nouveauté est l'utilisation d'une roue dentée, avatar de celle qu'avait utilisé Félix Savart pour produire des sons de fréquence connue. La distance de la maison de la famille de Fizeau à Suresnes, où se trouve la station principale, à Montmartre où est placée la lunette de renvoi, est de 8 633 mètres. La roue à 720 dents et une occultation se produit lorsqu'elle tourne à 12,6 tours par seconde. A vitesse double on voit de nouveau la lumière qui passe au retour entre les deux dents suivantes, puis en augmentant toujours la vitesse une nouvelle occultation, etc. Fizeau en déduit la vitesse de la lumière : 70 948 lieues par seconde^l, soit 315 300 kilomètres par seconde. Fizeau ne fait pas grand cas de cette valeur numérique, car il sait que la vitesse de rotation de sa roue dentée n'est pas connue avec précision : mais il a montré qu'il est possible de mesurer directement sur Terre la vitesse de la lumière. Son expérience aura un grand retentissement, et l'Académie des sciences, sous l'impulsion d'Arago, proposera le financement d'un appareil perfectionné qui devait permettre une mesure plus précise. Mais cet appareil, commencé par Froment, ne sera jamais achevé.

^k L'appareil original a disparu, car des éléments ont été réutilisés par Fizeau pour d'autres expériences. Une réplique postérieure modifiée se trouve au musée de l'École polytechnique.

^l On voit que le système métrique n'est pas encore utilisé en pratique un demi-siècle après la Révolution, même par les scientifiques, bien qu'il ait été rendu obligatoire en 1840.

Figure 4.18. L'appareil de Fizeau. Le faisceau lumineux provenant de la lampe (qui est en réalité un morceau de craie chauffé à blanc par un chalumeau) est haché par la roue dentée entraînée par un mouvement d'horlogerie à poids, dont une vue de dessus est présentée en haut à gauche. La lunette envoie le faisceau de Suresnes à Montmartre, où une autre lunette munie d'un miroir la renvoie vers la première. Le faisceau repasse dans la roue dentée et on l'examine à travers l'oculaire. Un compte-tours et un chronomètre permettent de connaître la vitesse de rotation de la roue. D'après *l'Astronomie populaire* d'Arago.

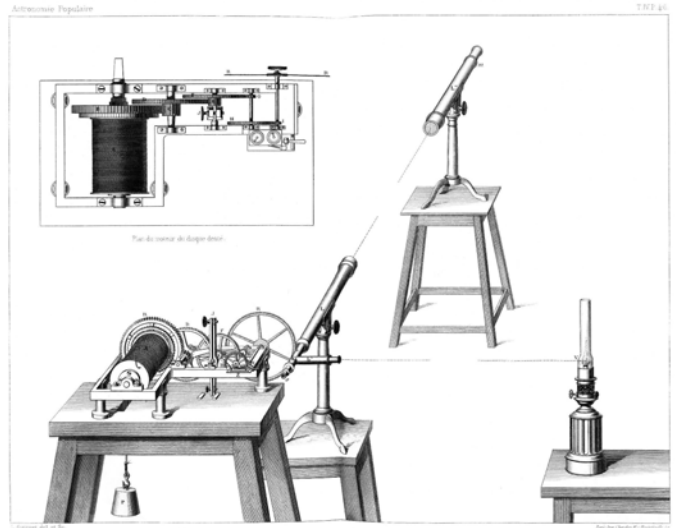
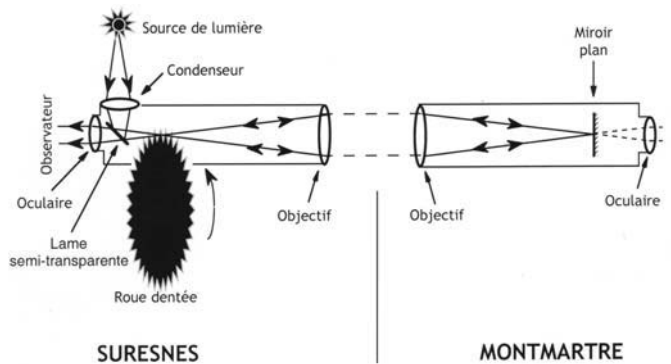


Figure 4.19. Schéma de principe de l'appareil de Fizeau. Il utilise des lunettes existantes qu'il a modifiées. A droite, la lunette contient un miroir plan situé à son foyer, ce qui lui donne la propriété de renvoyer la lumière dans la direction d'arrivée même si elle n'est pas bien alignée. Pour réaliser cette condition, Fizeau observe dans une partie non argentée du miroir l'image d'objets éloignés et déplace le miroir jusqu'à ce qu'il soit exactement au foyer.



La vitesse de la lumière après Arago

Bien qu'Arago soit mort en 1853, peu après les expériences dont nous venons de parler, il nous paraît intéressant d'exposer brièvement la suite de l'histoire.

C'est Urbain Le Verrier, l'ennemi juré d'Arago, qui lui succède à la direction de l'Observatoire de Paris. Son but

scientifique est d'appliquer la mécanique newtonienne à l'ensemble du Système solaire, incluant les perturbations gravitationnelles mutuelles des planètes : c'est d'ailleurs ainsi qu'il a découvert Neptune en 1846. Vers 1858, il conclut de ses calculs que la valeur alors adoptée pour la distance de la Terre au Soleil^m, soit environ 153,5 millions de kilomètres, est surestimée²⁹. Il propose 147 millions de kilomètres. Comme on connaît alors assez bien le temps que met la lumière à parcourir cette distance, soit 497,8 secondes (à l'époque ; la valeur moderne est 499,005 secondes), il est possible de confirmer la proposition de Le Verrier en mesurant avec précision la vitesse de la lumière, reprenant en quelque sorte à l'envers le calcul qu'Arago avait fait pour obtenir la vitesse de la lumière à partir de données astronomiques. Le Verrier incite donc Foucault, devenu « *physicien de l'Observatoire* », à mesurer précisément la vitesse de la lumière.

Foucault reprend la méthode du miroir tournant et fait construire par Froment un appareil dont il avait annoncé les principes dès 1850³⁰, et qui prend en compte l'expérience acquise lors de la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air (figure 4.21). L'appareil original est conservé à l'Observatoire de Paris, et des répliques d'époque existent en plusieurs endroits. Le miroir tournant (figure 4.22) est cette fois entraîné par une turbine à air comprimé alimentée par une soufflerie très stable construite par le facteur d'orgues Aristide Cavaillé-Coll. Sa vitesse — un point critique pour la mesure — est réglée à 400 tours par seconde par stroboscopie (figure 4.23). La distance aller-retour parcourue par la lumière est de 40,4 mètres, grâce à un train de cinq miroirs de renvoi. Le déplacement de l'image est mesuré avec précision grâce à un micromètre. En 1862, Foucault mesure ainsi 298 000 kilomètres par seconde pour la vitesse de la lumière, avec une incertitude estimée de façon un peu optimiste à 500 kilomètres par secondeⁿ. Combinée avec le temps mis par la lumière pour parcourir la distance de la Terre au Soleil, cette mesure ramène

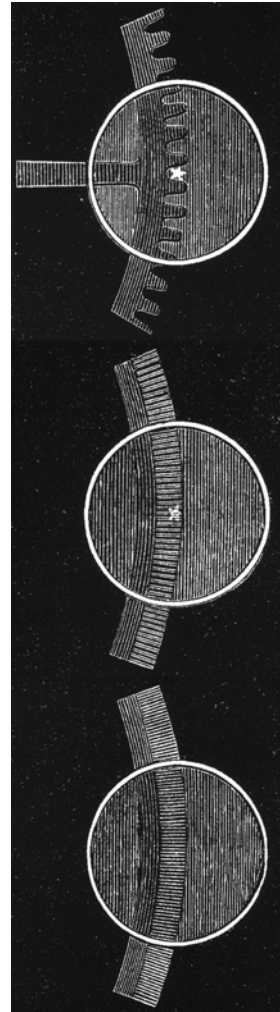


Figure 4.20. Ce que voit Fizeau dans son oculaire. Aux faibles vitesses de la roue dentée, le faisceau retour passe entre deux dents et on peut l'observer (en haut). En augmentant la vitesse, il commence à être occulté par le bord d'une dent (au milieu), puis est complètement occulté (en bas). Si l'on augmente encore la vitesse, on voit la lumière réapparaître, et ainsi de suite.

^m Plus précisément : le demi grand axe A de l'orbite terrestre. On exprimait à cette époque cette quantité sous la forme de la parallaxe π_0 du Soleil, c'est à dire l'angle sous lequel on verrait le rayon a de la Terre depuis le Soleil : $\sin \pi_0 = a/A$.

ⁿ C'est une des premières fois qu'un physicien a chiffré l'incertitude sur sa mesure.

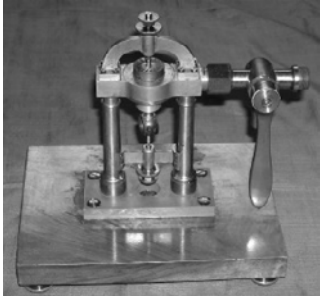


Figure 4.22. Le miroir tournant de Foucault (1862).

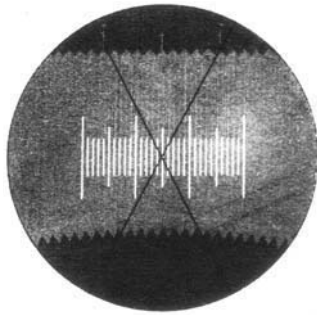


Figure 4.23. Ce que voit Foucault dans l'oculaire en 1862. L'image d'un micromètre se déplace par rapport aux fils du réticule de l'oculaire lorsque le miroir tourne. Alors, tout est éclairé par brèves impulsions à chaque tour du miroir, 400 fois par seconde. La roue dentée que l'on voit en bas est interposée dans le faisceau ; comportant 400 dents et tournant à 1 tour par seconde exactement, elle paraît immobile, une dent remplaçant l'autre, si le miroir tourne bien à 400 tours par seconde : ce procédé stroboscopique permet de régler sa vitesse avec précision.

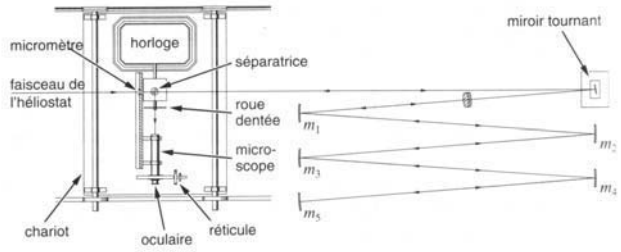


Figure 4.21. L'appareil de Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière en 1862. La lumière du Soleil renvoyée par un héliostat éclaire un micromètre puis arrive sur un miroir tournant. Celui-ci l'envoie via les miroirs m_1 , m_2 , m_3 et m_4 sur le miroir concave m_5 qui la renvoie sur le miroir tournant par le chemin inverse. Celui-ci, ayant légèrement tourné pendant ce temps, réfléchit la lumière dans une direction très légèrement différente de la direction d'arrivée. Une lame séparatrice semi-transparente envoie le faisceau sur le côté, et l'on peut observer dans l'oculaire l'image du micromètre, dont on mesure le déplacement par rapport aux fils d'un réticule. On voit aussi dans l'oculaire le bord d'une roue dentée entraînée par une horloge à 1 tour par seconde (voir la figure 4.23).

cette distance à 148,3 millions de kilomètres, peu différente de ce qu'a prédit Le Verrier.

Si les astronomes sont satisfaits du résultat de Foucault, certains physiciens ont des doutes. C'est le cas d'Alfred Cornu (figure 4.24), professeur de physique à l'École polytechnique, qui avait été l'élève de Fizeau. Vers 1871, il essaye la méthode de Fizeau et celle de Foucault et est déçu par le miroir tournant. Il reprend donc la méthode de Fizeau, mais sans tenter de maintenir constante la vitesse de rotation de la roue dentée ; au contraire, il l'accélère ou la décélère continuellement, et des contacts électriques sur un des rouages du moteur d'entraînement inscrivent automatiquement des signaux à chaque tour sur du papier enroulé sur un cylindre ; un autre stylet marque des tops de temps. Cornu inscrit sur le même cylindre les moments des occultations et des réapparitions de la lumière, et peut donc tout à loisir reconstituer ultérieurement la vitesse de rotation de la roue à ces instants.

Les premiers essais ont lieu entre l'École polytechnique, qui est alors sur la montagne Sainte-Geneviève, et une ancienne tour de télégraphe située à 2,5 km, puis en 1872 entre cette école et le Mont Valérien, à 10 kilomètres ; Cornu mesure lui-même cette distance par triangulation. Il obtient alors une valeur de 298 500 kilomètres par seconde pour la vitesse de la lumière, une valeur très proche de celle de Foucault : ses réserves sur la mesure de Foucault se transforment alors en admiration. Encouragé par Le Verrier et par Fizeau, Cornu reprend en 1874 ses mesures, cette fois entre l'Observatoire de Paris et la Tour de Montlhéry, avec de nouveaux appareils construits par Breguet (figure 4.25 et figure 4.26). La distance était assez bien connue, mais Cornu juge bon de la remesurer en utilisant des points géodésiques situés au Panthéon et à Villejuif. Il obtient une valeur de 300 400 kilomètres par seconde pour la vitesse de la lumière, avec une incertitude estimée à $1/1000$ ³¹.

C'est la dernière manifestation de la suprématie française concernant la mesure de la vitesse de la lumière. En 1878-79, Albert Michelson commence en effet une série de mesures de plus en plus précises utilisant une modification de la méthode de Foucault, mesures qui culminent dans les années 1920. Néanmoins l'appareil de Cornu est réinstallé en 1902 à l'Observatoire de Nice, par son directeur Henri Perrotin ; la station de renvoi de la lumière est à La Gaude, à environ 15 km. La valeur trouvée, $299\,880 \pm 84$ km/s dans le vide, est en bon accord avec la valeur définitive.

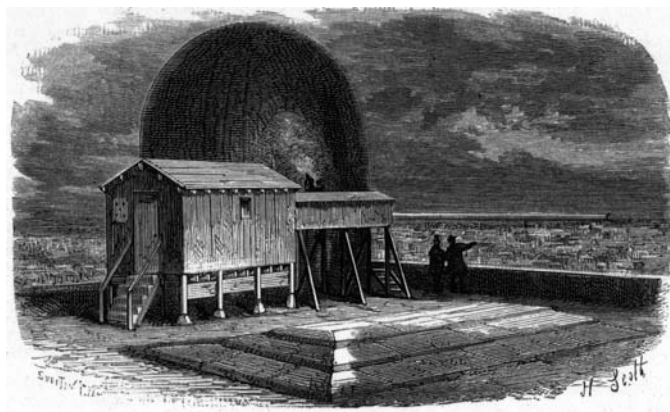
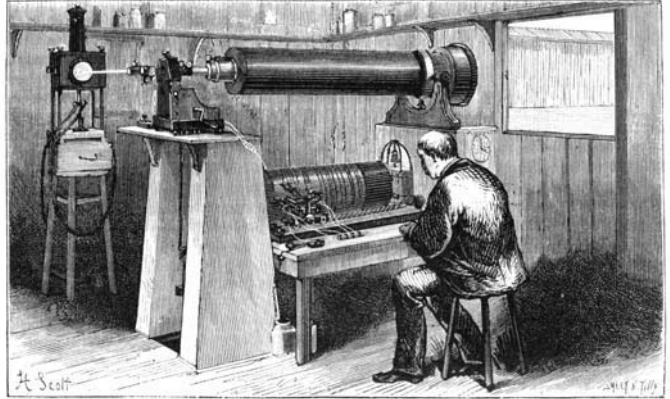


Figure 4.24. Alfred Cornu (1841-1902).

Figure 4.25. L'expérience de Cornu en 1874 (vue extérieure). La cabane provisoire sur la terrasse de l'Observatoire de Paris abrite la station principale pour la mesure de la vitesse de la lumière. La partie allongée contient la lunette, dont l'objectif de 38 cm avait été construit pour la lunette équatoriale située dans la coupole visible à l'arrière, mais s'est révélé inutilisable pour l'observation astronomique. Le faisceau lumineux (en réalité totalement invisible) aboutit à la Tour de Montlhéry, où une lunette de 15 cm de diamètre munie d'un miroir renvoie le faisceau vers l'Observatoire.

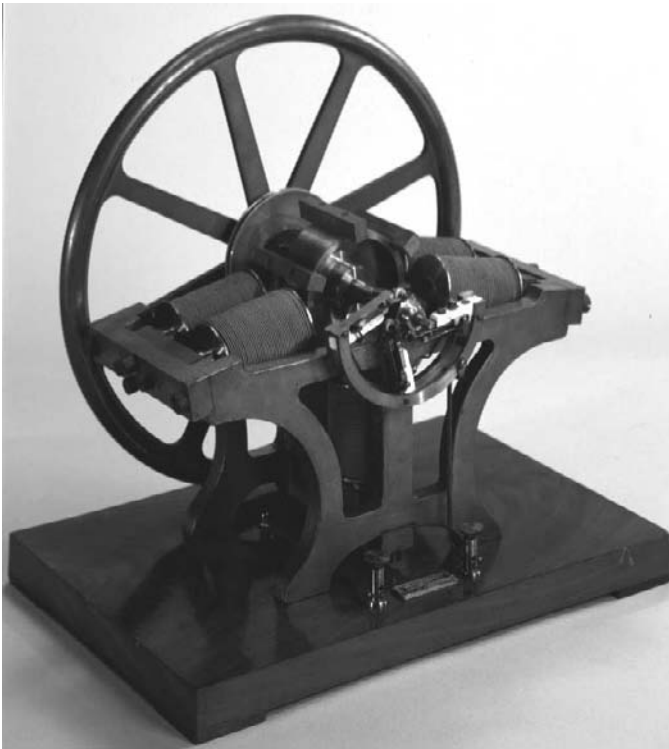
Figure 4.26. L'expérience de Cornu en 1874 (vue intérieure). La source de lumière est un morceau de craie chauffée à blanc par un chalumeau. La roue dentée et son moteur d'entraînement, de même que le moteur d'entraînement du cylindre avec son petit régulateur, subsistent à l'Observatoire de Paris.



Après Michelson et Perrotin, on n'utilisera plus ni le miroir tournant, ni la roue dentée, car on peut plus commodément hacher la lumière par divers moyens magnéto-ou électro-optiques. Puis d'autres méthodes sont arrivées pour déterminer la vitesse de la lumière : nous en dirons quelques mots au chapitre 6.

Chapitre 5

La naissance de l'électromagnétisme



Un moteur électrique rotatif de Froment datant du milieu du XIX^e siècle. Trois paires de bobines (une paire verticale est difficilement visible en dessous de l'axe) attirent tour à tour des barreaux de fer doux situé autour du rotor. Un commutateur situé à l'avant distribue le courant dans les bobines de façon à ce que l'action fasse tourner le rotor et le volant dans le sens voulu.

La pile électrique

Figure 5.1. L'« appareil à couronne de tasses » de Volta, formé d'une série de bacs où trempaient des électrodes de zinc (Z) et d'argent (A) reliées entre elles par les conducteurs a. Le zinc pouvait être remplacé par l'étain et l'argent par le cuivre.

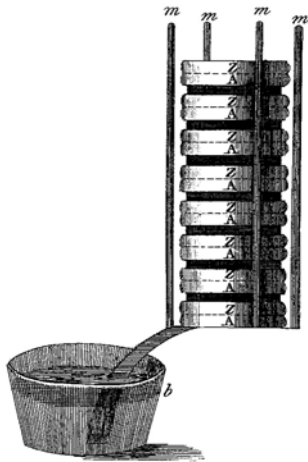


Figure 5.2. L'« organe électrique artificiel » de Volta, formé d'un empilement de disques de zinc (Z) et d'argent (A) séparés par des rondelles de drap humecté par de l'eau salée ou de la lessive alcaline. La mèche b trempant dans un récipient rempli d'eau salée est connectée à l'électrode inférieure : on trempait une main dans le récipient et posait l'autre sur le sommet de la pile pour en sentir les effets. Les disques sont tenus en place par les baguettes isolantes m.

À la fin du XVIII^e siècle, on ne connaissait de l'électricité que l'électrostatique. Cependant l'invention en 1799 par l'italien Alessandro Volta¹ de la pile électrique (figure 5.1 et figure 5.2) devait ouvrir de nouveaux horizons².

Bientôt on construit des batteries de piles souvent très importantes, non plus avec des empilements comme celle de Volta, mais en associant les piles à auges inventées par William Cruikshank, qui sont constituées d'une série de plaques de cuivre et de zinc soudées l'une à l'autre et trempant dans l'acide sulfurique dilué. En 1807, Wollaston construit une grande pile pour la Royal Institution de Londres comportant 2000 plaques doubles de 10x10 cm, donnant environ 2 200 volts. Utilisée par Humphry Davy, elle lui permettra de découvrir le sodium et le potassium par électrolyse de sels fondus et de faire des expériences sur l'arc électrique. Peu de temps après, Napoléon I^{er} fait installer à l'École polytechnique une pile de 600 éléments (figure 5.3). Une autre assez semblable à celle de Londres existe à Genève, et la liste n'est certainement pas complète.

Ces instruments très onéreux étaient en quelque sorte les équivalents de nos modernes accélérateurs de particules. La critique n'a pas manqué. Des commentateurs de l'époque ont proclamé que la pile de l'École polytechnique était un investissement peu rentable :

« Une somme assez considérable fut accordée en France, il y a quelques années, pour la construction d'un appareil voltaïque qui serait mis à la disposition des chimistes les plus habiles. On dut espérer des merveilles de cette belle dotation ; l'effet s'en réduisit à cette sorte de galvanisme moral, à une de ces secousses d'opinion que le chef du gouvernement visait toujours à produire... »

Ce à quoi Arago a répondu³ :

« Puisque les rédacteurs n'ont jamais ouï dire que la science ait tiré aucun profit de cet instrument, je suis bien aise de

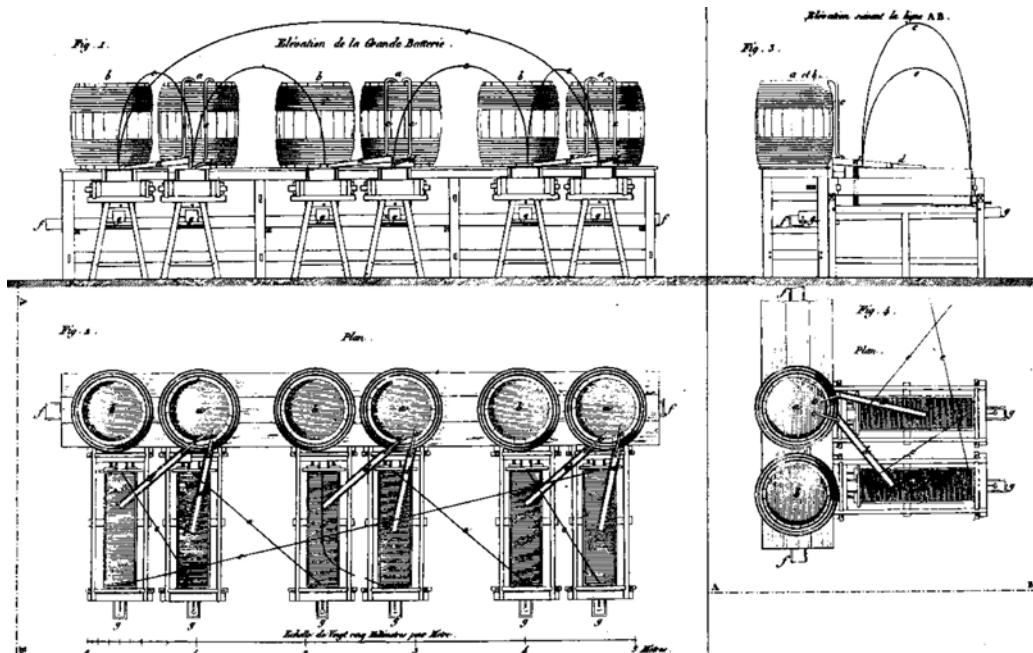


Figure 5.3. La pile installée à l'École polytechnique par Gay-Lussac et Thenard. Elle comportait 6 bacs contenant chacun 100 paires de plaques de 9 décimètres carrés de surface. Chaque paire se composait d'une plaque de cuivre de 1 kg et d'une plaque de zinc de 3 kg. On voit les conducteurs qui connectaient en série les plaques de chaque bac. Les tonneaux servaient à déverser dans les bacs une solution d'acide, ou de l'eau de rinçage après vidange. L'ensemble devait fournir une dizaine d'ampères sous 660 volts.

leur apprendre ou de leur rappeler qu'il existe un ouvrage en deux volumes de MM. Gay-Lussac et Thenard, qui remonte à l'année 1811 ; que cet ouvrage, qui a pour titre « Recherches physico-chimiques faites avec la pile, etc. »⁴, renferme un chapitre très-étendu sur les causes qui font varier l'énergie d'une batterie galvanique [etc]. »

Les piles servent surtout aux chimistes pour faire des électrolyses. Mais elles seront bientôt utilisées pour les recherches sur l'électricité.

L'expérience d'Ørsted⁵

On ne sait pas de quel type de pile disposait le physicien danois Hans Christian Ørsted (ou Ørsted, figure 5.4). On le représente souvent en train de faire sa célèbre



Figure 5.4. Hans Christian Ørsted (1777-1851).

Figure 5.5. L'expérience d'Ørsted. Des aiguilles aimantées placées au dessus ou au dessous d'un courant horizontal, dont le pôle Nord est peint en noir, sont déviées dans le sens indiqué.

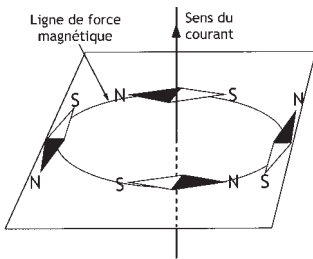
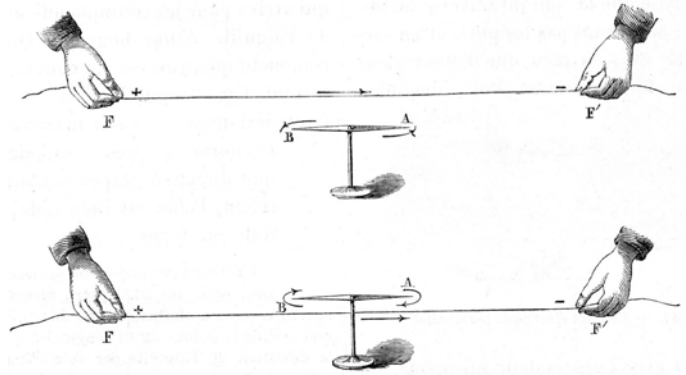


Figure 5.6. Variante de l'expérience d'Ørsted. Des aiguilles aimantées placées autour d'un courant vertical sont déviées comme indiqué (du moins si le champ magnétique terrestre est négligeable par rapport au champ créé par le courant) ; on a également représenté la ligne de force magnétique qui passe par les aiguilles.

expérience dans son laboratoire avec une pile de Volta de taille moyenne, mais ces représentations sont tardives. Toujours est-il qu'il découvre en 1820 une propriété nouvelle de l'électricité : une aiguille aimantée est déviée si on la place à proximité d'un conducteur parcouru par un courant électrique (figure 5.5 et figure 5.6).

L'expérience d'Ørsted paraît très surprenante, car elle met en évidence pour la première fois une force qui n'est pas dirigée selon la droite qui joint les deux corps qui interagissent, mais dans une direction perpendiculaire. Elle a donc un retentissement immédiat, et va être le point de départ d'une quantité de recherches menées un peu partout en Europe et aux Etats-Unis. C'est Arago qui la fait connaître en France, l'ayant vue à Genève où l'on venait de traduire le mémoire de 1820, qui était en latin⁶. Arago s'est en effet rendu à Genève en août 1820 à l'invitation de plusieurs savants qu'il avait rencontrés en France : le botaniste Augustin Pyrame de Candolle, qui avait été directeur du jardin botanique et recteur de l'Université de Montpellier, et aussi membre de la Société d'Arcueil, le physicien Charles Gaspard De La Rive qui avait utilisé la pile de l'Ecole polytechnique et celle de Davy à Londres, et enfin Marc-Auguste Pictet, un autre physicien qui avait participé avec Arago à des travaux de géodésie. Arago écrit⁷ :

« Les lecteurs des Annales auront remarqué que nous n'accueillons pas, en général, trop à la légère, les annonces des découvertes extraordinaires, et jusqu'ici nous n'avons eu qu'à nous applaudir de cette réserve ; mais à l'égard du Mémoire de M. Ørsted, les résultats qu'il renferme, quelque singuliers qu'ils puissent paraître, sont accompagnés

de trop de détails pour donner lieu à aucun soupçon d'erreur. J'ajouterai d'ailleurs que M. le professeur de la Rive, de Genève, qui a découvert lui-même des phénomènes extrêmement curieux avec les puissantes piles voltaïques qu'il possède, ayant bien voulu me permettre d'assister à la vérification qu'il a faite des expériences de M. Ørsted devant MM. Prévost, Pictet, [Nicolas Théodore] de Saussure, [Alexandre] Marcet, de Candolle, etc., j'ai pu me convaincre moi-même de l'exactitude des résultats principaux donnés par le savant Danois. »

Ørsted mentionne un « conflit électrique » entourant le fil conducteur, en notant que « ce conflit fait des cercles ». Il veut probablement dire par là que des aiguilles aimantées entourant un conducteur à une même distance s'orientent tangentiellement à un cercle centré sur ce conducteur (voir la figure 5.6) ; Michael Faraday comprendra plus tard qu'il s'agit d'une ligne de force du champ magnétique.

Les premières expériences d'Ampère

Dès son retour de Genève, Arago s'empresse de refaire l'expérience d'Ørsted devant l'Académie des sciences, le 11 septembre 1820. Il en parle avec enthousiasme à ses amis, et se met en quête de piles pour faire lui-même des expériences. Il en utilisera plusieurs, dont probablement la pile de l'École polytechnique, où André-Marie Ampère (figure 5.7 ; encadré 5.1) était professeur. Ampère a vu à l'Académie l'expérience d'Ørsted présentée par Arago, ce qui a suscité également chez lui une grande excitation. Nos deux savants travaillent d'abord chacun de leur côté, mais en restant en relation étroite, puis travaillent ensemble. Ampère prendra plus tard bien soin de préciser la contribution de chacun et celle de Faraday⁸ :

« On sait que M. Ørsted a reconnu le premier l'action directrice des conducteurs voltaïques sur les aimants ; M. Faraday, l'action révolutive toujours dans le même sens qui a lieu entre un conducteur et un aimant [voir plus loin] ; M. Arago, la propriété qu'ont ces mêmes conducteurs de rendre magnétiques le fer et l'acier ; et M. Ampère, tout ce qui est relatif à leur action mutuelle et à celle qui est exercée sur eux par le globe terrestre, ainsi que la rotation d'un aimant ou d'un fil conducteur autour de son axe. »



Figure 5.7. André-Marie Ampère (1775-1836).

Encadré 5.1. André-Marie Ampère⁹

Né à Lyon en 1775, Ampère se passionne très jeune pour la science, principalement pour les mathématiques. À 13 ans, il envoie un mémoire de géométrie à l'Académie de Lyon. Mais la Révolution, à laquelle il adhère, le plonge dans le désarroi car son père est guillotiné. Sa femme, épousée en 1799, meurt de tuberculose en 1803. Son second mariage, en 1806, sera malheureux et se terminera par un divorce deux ans après. Nommé professeur de physique et de chimie à l'École centrale de Bourg-en-Bresse en 1802, Ampère envoie à Delambre un mémoire intitulé *Considérations sur la théorie mathématique du jeu*, dans l'espoir d'être muté à Lyon où étaient restés sa femme et son fils. Delambre et Laplace le remarquent, et il est effectivement nommé à Lyon en 1803, puis en 1804 à l'École polytechnique comme répétiteur d'analyse. Deux ans plus tard, il est élu professeur d'analyse, fonction qu'il occupera jusqu'en 1822. Il est cependant attiré par la chimie et montre, entre autre, que l'« *acide fluorique* » est composé d'hydrogène et d'un élément inconnu, le fluor. En 1814, il énonce indépendamment d'Avogadro la loi aujourd'hui connue comme loi d'Avogadro-Ampère : « *Des volumes égaux de gaz dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent le même nombre de molécules* ». Il participe avec Fresnel à des recherches en optique. Il est élu à l'Académie des sciences la même année. En 1819, il commence à enseigner la philosophie à la Faculté des lettres de Paris, donnant un cours sur la « *classification des faits intellectuels* ». Mais la découverte d'Ørsted va changer ses centres d'intérêt : au prix d'un travail acharné qui mine sa santé, il crée l'électromagnétisme en moins de quatre mois, au cours d'une compétition acharnée avec Biot. Il est nommé professeur au Collège de France en 1824. La synthèse qu'il publie en 1826 sur l'électromagnétisme est son dernier grand ouvrage scientifique. Le reste de sa vie est consacré à la classification des sciences. Nommé en 1828 Inspecteur général de l'instruction publique, il meurt de pneumonie à Marseille en 1836, au cours d'une tournée d'inspection.

Ampère va concevoir de magnifiques expériences qu'il décrit dans une série de mémoires¹⁰. Il distingue de façon très claire la tension électrique (que nous appelons aujourd'hui différence de potentiel) et le courant électrique :

« L'action électro-motrice se manifeste par deux sortes d'effets que je crois devoir d'abord distinguer par une définition précise.

« J'appellerai le premier tension électrique, le second courant électrique.

« Le premier s'observe lorsque les deux corps entre lesquels l'action électro-motrice a lieu sont séparés l'un de l'autre [...] ; le second est celui où ils font, au contraire, partie d'un circuit de corps conducteurs.[...]

« Dans le second cas, il n'y a plus de tension électrique, les corps légers ne sont plus sensiblement attirés [...] ; cependant l'action électro-motrice continue d'agir ; car si de l'eau, par exemple, un acide, un alcali ou une dissolution saline font partie du circuit, ces corps sont décomposés, surtout quand l'action électro-motrice est constante, comme on le sait depuis long-temps ; et en outre, ainsi que M. Cæsted vient de le découvrir, quand l'action électro-motrice est produite par le contact des métaux, l'aiguille aimantée est détournée de sa direction lorsqu'elle est placée près d'une portion quelconque du circuit... »

Il admet, comme tout le monde à l'époque, que le courant électrique est double, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative. Mais il dit qu'il ne parlera pour simplifier que d'un seul courant électrique, dont le sens est celui de l'électricité positive. Il mentionne que l'électromètre sert à mesurer la tension, et l'aiguille aimantée le courant ; il donne le nom de *galvanomètre* (du nom de Luigi Galvani, le précurseur de Volta) à un instrument permettant de mesurer le courant, qui utilise l'aiguille aimantée (figure 5.8).

Vient maintenant sa découverte fondamentale :

« [J'ai découvert des effets remarquables] en disposant, dans des directions parallèles, deux parties rectilignes de deux fils conducteurs joignant les extrémités de deux piles voltaïques. [...] J'ai observé alors qu'en faisant passer à la fois un courant électrique dans chacune d'elles, elles s'attiraient mutuellement quand les deux courans étaient dans le même sens, et qu'elles se repoussaient quand ils avaient lieu dans des directions opposées. »

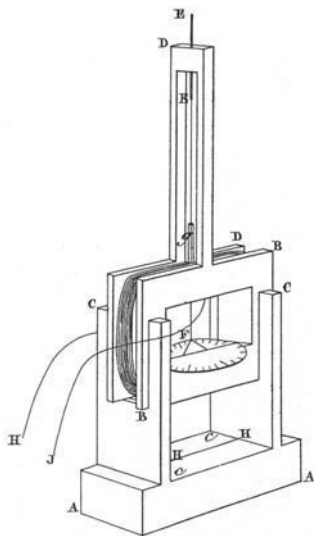


Figure 5.8. Un galvanomètre, perfectionnement du multiplicateur électromagnétique de Schweigger, construit par Cæsted en 1822 ou 1823¹¹. L'aiguille aimantée F, suspendue par un fil au-dessus d'un cadran gradué fixe, est déviée par le courant circulant dans le cadre. Le terme « *multiplicateur* » vient de ce que plusieurs tours de fil sont utilisés au lieu d'un seul dans les premières expériences, ce qui augmente l'effet sur l'aiguille.

Cette découverte est faite sept jours seulement après l'annonce de celle d'Ersted ! Ampère fait ensuite construire pour ses expériences des dispositifs très soignés dont la figure 5.9 montre deux exemples^a.

Dans une autre expérience, Ampère enroule un conducteur sur un tube isolant de petit diamètre et montre que cette bobine se comporte comme un aimant (figure 5.10). Cette expérience lui suggère que les aimants sont le siège de courants en boucle fermée. Il tente ainsi, ce qui est son but profond, d'unifier le magnétisme et les propriétés des courants électriques. On lit en effet dans un résumé de quelques-uns de ses mémoires les phrases suivantes¹² :

« Le but général est d'établir l'identité de l'électricité et du magnétisme.[...] M. Ampère a conclu que les phénomènes qu'offrent les aimants sont de purs phénomènes électriques, et qu'il sont dus uniquement à ce que l'électricité est disposée ou se meut dans un aimant suivant des courbes fermées tracées dans des plans perpendiculaires à l'axe de l'aimant, précisément comme elle est disposée ou se meut dans un circuit voltaïque.[...] Ses idées [...] ont contribué aux importantes découvertes de M. Arago sur l'aimantation de l'acier par l'électricité, en le portant à plier le fil conducteur en hélice. »

Ampère établit aussi la formule qui donne la force qui s'exerce entre deux éléments de courant électrique, mais sans coefficient numérique : comment le pourrait-il d'ailleurs, puisqu'il n'y a aucun moyen de mesurer quantitativement l'intensité du courant ? Plus tard, on définira justement l'intensité du courant à partir de la force qui s'exerce entre deux conducteurs, en donnant à l'unité le nom d'*ampère*, dont voici la définition officielle :

« L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre, dans le vide, produirait entre ces deux conducteurs une force de $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur. »

^a Très maladroit de ses mains, Ampère rate le plus souvent ses expériences quand il doit les faire devant un auditoire. Arago et Fresnel, qui sont beaucoup plus habiles, l'aident discrètement quand ils le peuvent.

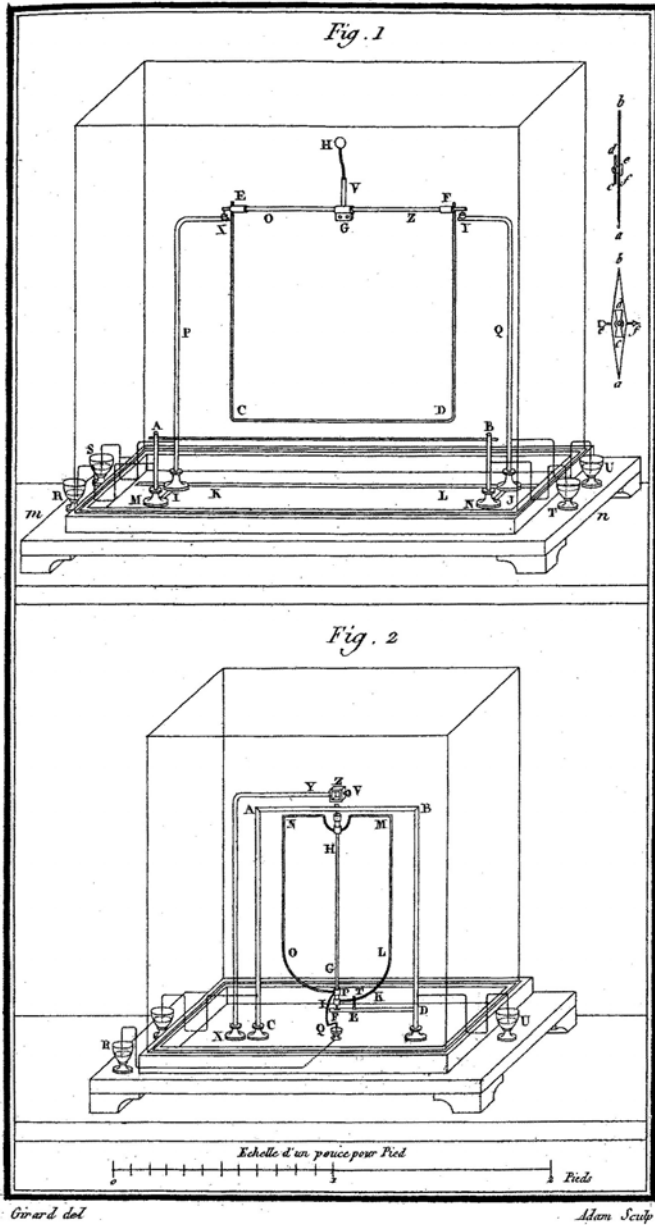
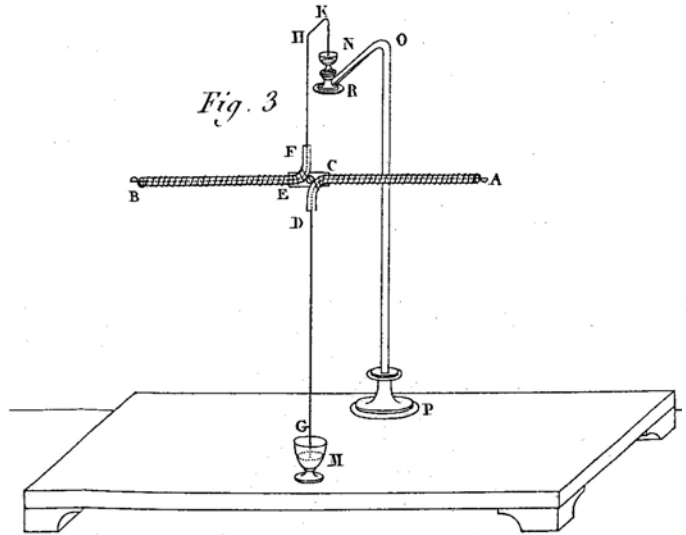


Figure 5.9. Deux des expériences d'Ampère. Elles sont placées dans des cages de verre. En haut, le conducteur CD est attiré ou repoussé par le conducteur AB selon que les courants sont parallèles ou opposés ; remarquer le contrepoids H au dessus du cadre. Les contacts sont établis par des godets à mercure. En bas, le conducteur NM se place parallèlement au conducteur AB si les courants sont dans le même sens, et se retourne si on change le sens du courant.

Ampère n'est pas le seul à avoir établi les formules de base de l'électrodynamique. Il y a en octobre 1820 une véritable course entre Jean-Baptiste Biot, Félix Savart et lui pour établir une expression mathématique susceptible de représenter les effets du courant électrique. Le 30 octobre,

Figure 5.10. Une autre expérience d'Ampère. Il enroule sur des tubes isolants deux bobines conductrices en série, le courant revenant du bout de chaque bobine par l'intérieur du tube. Lorsque le courant est établi, cet ensemble se comporte comme un aimant : il s'oriente vers le Nord comme une aiguille de boussole, attire la limaille de fer à ses extrémités, etc.



Biot et Savart présentent à l'Académie des sciences « un Mémoire dont l'objet est de déterminer, par des mesures précises, les lois physiques suivant lesquelles les fils de métal mis en communication avec les deux pôles de l'appareil voltaïque agissent sur les corps aimantés »¹³. Suspendant une aiguille aimantée dans diverses positions par rapport au conducteur rectiligne et de grande longueur, ils apprécient l'« action éprouvée par une molécule de magnétisme austral ou boréal » en observant la direction d'équilibre de l'aiguille et sa période d'oscillation autour de cette position. Ils inaugurent ainsi une méthode qui sera longtemps adoptée pour mesurer de façon relative l'intensité du champ magnétique. Ils en déduisent que la direction d'équilibre est perpendiculaire à la direction du courant et que la « force magnétique » est inversement proportionnelle à la distance au fil.^b

Quelques jours plus tard, Laplace montre que ceci implique que la « force magnétique » créée par un élément

^b On désigne souvent aujourd'hui sous le nom de loi de Biot et Savart l'expression qui donne le champ magnétique créé par un élément de courant, champ qui est inversement proportionnel au carré de la distance à cet élément ; c'est une extension abusive car ce ne sont pas eux, mais Laplace puis Ampère qui ont donné cette forme différentielle de la loi. C'est en l'intégrant sur un courant rectiligne infini que l'on trouve que le champ est alors inversement proportionnel à la distance au conducteur, ce que Biot et Savart ont réellement observé.

de courant est inversement proportionnelle au carré de la distance à cet élément : un résultat bien satisfaisant pour les newtoniens, pour lesquels les actions à distance doivent être proportionnelles à l'inverse du carré de cette distance, comme c'est le cas pour la gravité, l'électrostatique et même le magnétisme comme Coulomb l'a montré avec un aimant de grande longueur.

De son côté, Ampère écrit, au prix de grands efforts, la formule différentielle qui donne la force exercée par un élément de courant sur un autre¹⁴. Pour la première fois, cette formule contient le paramètre essentiel du courant : son intensité. Elle lui permet de calculer par intégration ce qui se passe avec un courant rectiligne, circulaire ou « plié en hélice »¹⁵.

L'intervention d'Arago

Pendant ce temps Arago fait d'autres expériences. Laissons-lui la parole¹⁶ :

« Ayant adapté un fil cylindrique de cuivre assez fin, à l'un des pôles de la pile voltaïque, je remarquai qu'à l'instant où ce fil était en communication avec le pôle opposé, il attirait la limaille de fer doux, comme l'eût fait un véritable aimant.

« Ce fil, plongé dans la limaille, s'en chargeait également tout autour, et acquérait, par cette addition, un diamètre presque égal à celui d'un tuyau de plume ordinaire.

« Aussitôt que le fil conjonctif [c'est-à-dire : qui joint les deux pôles] cessait d'être en communication avec les deux pôles de la pile à la fois, la limaille se détachait du fil et tombait.[...]

« Cette attraction [...] diminue fort rapidement à mesure que l'action de la pile s'affaiblit [...] »

ce qui n'a rien d'étonnant car il faut une très forte intensité pour voir ce phénomène. Arago réalise aussi de la même manière l'aimantation permanente de petits fragments d'acier et d'une aiguille d'acier. Il ajoute :

« Ampère, à qui je montrai les expériences que je viens de rapporter [...], venait de faire [son] importante découverte [...]; il avait de plus tiré de là, par analogie, cette conséquence que les propriétés attractives et répulsives des aimants dépendent de courants électriques qui circulent autour des molécules de fer et d'acier. [...] Ces vues

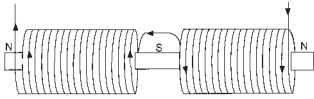


Figure 5.11. Arago, plaçant un long barreau de fer dans deux bobines enroulées en série en sens inverse, obtient les pôles magnétiques indiqués dans la figure.

théoriques lui suggérèrent à l'instant la pensée qu'on obtiendrait une plus forte aimantation en substituant au fil conjonctif droit dont je m'étais servi, un fil plié en hélice au centre duquel l'aiguille d'acier serait placée. »

Sitôt dit, sitôt fait. Voici ce qu'en disent Ampère et le physicien Jacques Babinet en 1822¹⁷:

« D'après les considérations [qu'Ampère] avait faites sur l'existence et sur le sens des courans électriques dans les aimans, [Arago et lui] pensèrent que si l'on entourait un barreau d'acier des spires d'un fil conducteur plié en hélice, il se produirait, dans ce barreau, des courans qui seraient dans le même sens que ceux de l'hélice enveloppante ; en sorte que les deux extrémités du barreau, celle-là deviendrait un pôle austral, qui serait à gauche des courans transversaux de l'hélice pour l'observateur situé dans ces courans et regardant le barreau.[...] Or c'est ce que l'expérience a confirmé complètement.[...]

« Avec un seul fil d'acier, engagé dans deux hélices différentes pliées autour d'un même tube en sens contraire, on obtient dans la partie du fil d'acier qui répond à la jonction des deux hélices, un des pôles intermédiaires que l'on nomme points conséquens ; en sorte que les deux extrémités du barreau ont, par exemple, l'une et l'autre un pôle boréal ; le milieu montrant toutes les propriétés d'un pôle austral [figure 5.11]. [...] Avec le même procédé [...] on peut développer autant de points conséquens que l'on veut sur le même barreau.

« M. Arago s'est aussi assuré qu'un fil conducteur droit n'agit point pour aimanter une aiguille que l'on dispose parallèlement à sa longueur.[...]

« M. Arago a complété les résultats qu'il avait obtenus avec la pile, en produisant les mêmes effets au moyen de l'électricité ordinaire. Il suffit pour cela de faire passer au travers des spires d'une hélice une série d'étincelles tirées du conducteur d'une machine électrique. Si on les tire d'un conducteur positif, l'effet est le même pour l'aimantation du fil renfermé dans l'hélice que si le bout de cette hélice était mis en communication avec le pôle positif de la pile.[...]

« M. Arago a montré par une expérience très-simple que quand un barreau est aimanté sur une partie de sa longueur, cette partie tend, par son action sur le reste du barreau, à en continuer l'aimantation dans le même sens, pourvu qu'il ne soit pas d'une trempe trop dure. »

Ce texte, qui est en parfait accord avec ce que dit par ailleurs Arago¹⁸, est intéressant à plusieurs titres. D'une

part, ce qu'il décrit est l'invention de l'électroaimant par nos deux savants, et non pas par Arago seul comme on le prétend souvent ; d'autre part, on y voit qu'Arago a montré l'identité de l'électricité provenant d'une pile avec celle produite par une machine électrostatique, ce qui était déjà clair dans l'esprit d'Ampère mais méritait une confirmation expérimentale.

Les démarches de recherche d'Ampère et d'Arago sont très différentes. Ceci n'empêche pas leur collaboration d'être harmonieuse, Arago ne cherchant jamais à écraser de son autorité considérable un savant moins célèbre, mais dont il reconnaît le génie : cette attitude est semblable à celle qu'il a eue précédemment vis-à-vis de Fresnel. Arago est essentiellement un expérimentateur qui ne cherche pas à approfondir les raisons de ce qu'il observe. Ampère est plus profond : c'est non seulement un expérimentateur imaginatif et soigneux, bien que malhabile, mais il cherche à établir les lois de ce qu'il voit, et dans une certaine mesure à en comprendre la raison physique. Sur ce dernier point, il sera dépassé par Faraday.

Arago et Faraday : la transformation de l'énergie

Les premiers moteurs électriques

Ampère et Arago ont bien vu que l'action mutuelle des courants entre eux ou avec des aimants se traduit par des forces, et Ampère a réalisé une expérience où un conducteur acquiert « *un mouvement continu de révolution sous l'effet d'un aimant, de la Terre ou d'un autre conducteur* »¹⁹. Michael Faraday (figure 5.12 ; encadré 5.2) avait observé avant Ampère, un tel mouvement, en réalisant les deux expériences représentées figure 5.13²⁰.

Ampère et Faraday devaient vite avoir des émules :

« Dès les premières découvertes sur les propriétés de l'électricité en mouvement, on a beaucoup diversifié la forme des appareils destinés à la recherche ou à la démonstration de ces propriétés. D'abord, chaque observateur a inventé des instrumens pour démontrer isolément les phénomènes qu'il découvrirait : tels sont les appareils avec lesquels M. Ampère a fait ses premières expériences et ceux qu'il a imaginés depuis pour les différents cas où il se produit des mouvements de



Figure 5.12. Michael Faraday (1791-1867).

Encadré 5.2. Michael Faraday (1791-1867)

Faraday est né près de Londres dans une famille pauvre. Son éducation est très rudimentaire, et il est pendant sept ans apprenti relieur, spécialité où se développe sa remarquable dextérité manuelle. Son intérêt pour la science vient de la lecture d'un article peu orthodoxe sur l'électricité paru dans l'*Encyclopædia Britannica*, ce qui développera son esprit critique. Il fait partie en 1810 d'une société scientifique, la *City Philosophical Society*, puis suit les conférences d'Humphry Davy à la *Royal Institution*. Davy l'engage comme assistant, puis fait avec lui un long voyage en France et en Italie, où ils rencontrent beaucoup de savants. À son retour en 1815, Faraday se lance dans la chimie dont il deviendra vite un spécialiste reconnu. Il synthétise, en 1820, C_2Cl_6 et C_2Cl_4 et découvre le benzène en 1825, ce qui ne l'empêche pas de suivre le développement de l'électromagnétisme et d'y participer activement, culminant par sa découverte de l'induction en 1831. Il revient alors à la chimie et établit en 1834 les lois de l'électrolyse. Il commence en 1838 à rassembler des données éparses dans le but de fonder une théorie cohérente de l'électricité, découvrant à ce propos en 1845 le diamagnétisme et le paramagnétisme et la rotation du plan de polarisation de la lumière traversant certaines substances soumises à un champ magnétique. C'est alors qu'il commence à introduire la notion de champ, qui sera développée par son disciple Maxwell. Mais la détérioration de ses facultés intellectuelles et ses connaissances rudimentaires en mathématiques ne lui permettront pas de suivre les progrès de ce dernier. Il prend sa retraite en 1862 et meurt cinq ans plus tard. Il s'était marié en 1821, et son mariage fut très heureux. Par la variété, l'intérêt et la qualité de ses recherches fondamentales et appliquées, Faraday est incontestablement un des plus grands expérimentateurs qui aient jamais existé.

rotation continue, dès que M. Faraday eut fait connaître celui avec lequel il a obtenu un premier exemple de cette sorte de mouvement ; tels sont les appareils flottans de MM. De la Rive et Van der Heyden, la roue plongeante de M. Barlow [figure 5.14], etc. »

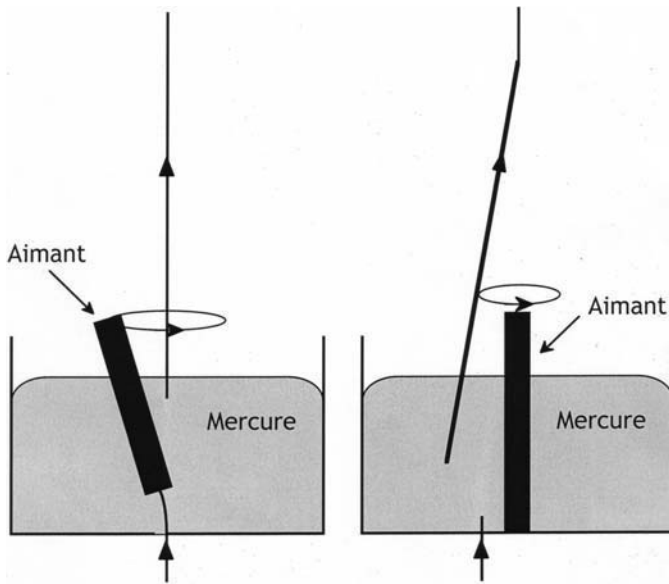


Figure 5.13. Les premiers moteurs de Faraday. A gauche, un aimant monté sur un fil conducteur flexible est en équilibre dans un bain de mercure sous l'effet de la force d'Archimède. Lorsqu'on fait passer le courant comme indiqué, cet aimant subit une force qui le fait tourner autour du conducteur vertical fixe. À droite, une tige conductrice suspendue trempe dans un bain de mercure. Un aimant vertical se trouve en dessous. Lorsque le courant passe, le champ magnétique exerce une force sur le courant, qui fait tourner le conducteur.

De son côté, Ampère décrit un instrument « *universel* », assez complexe²¹. Ces appareils sont les premiers moteurs électriques, où se produit une nouvelle forme de transformation de l'énergie : la transformation de la « *force électrique* » en « *force* » (lire : énergie) mécanique. Pas son expérience célèbre, Ørsted avait déjà montré la transformation de cette force électrique en « *force magnétique* ». On connaît aussi, grâce aux machines à vapeur, la transformation de la chaleur en énergie mécanique (et inversement). On n'ignore pas non plus la transformation de l'énergie électrique en énergie chimique dans l'électrolyse, et sa transformation inverse dans les piles.

Faraday a une vue originale des phénomènes qui se produisent dans ses appareils²². Loin de considérer directement, comme Ampère et les newtoniens, les forces exercées en droite ligne sur un courant par un aimant (ou par les courants internes fermés qui sont censés produire le magnétisme), ou par un courant sur un autre courant, il envisage une « *force magnétique circulaire* » qui actionne l'aimant ou la tige conductrice dans ses expériences (figure 5.13), une idée directement issue d'Ørsted (voir la figure 5.5). On voit poindre ici le concept de ligne de force, qui se révélera si fructueux.

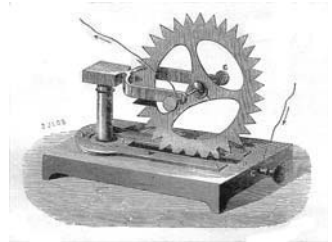


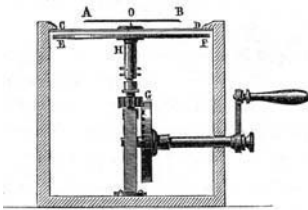
Figure 5.14. La roue de Barlow. C'est le moteur électrique primitif le plus connu, car son fonctionnement paraît un peu plus simple que celui du moteur de Faraday (figure 5.13), la topographie du champ magnétique étant plus facile à visualiser. Le courant entre par l'axe d'une roue en cuivre et sort par le bain de mercure dans lequel elle trempe. Un aimant horizontal en fer à cheval, posé sur le socle en bois, crée un champ magnétique perpendiculaire au plan de la roue. Son action sur le courant fait tourner la roue.

Le « magnétisme de rotation »

Après sa courte mais intense collaboration avec Ampère, Arago est parti vers de nouvelles aventures, en l'occurrence une collaboration avec Fresnel sur les lampes de phares, puis le rattachement de l'Angleterre à la France par triangulation. C'est au cours d'un voyage en Angleterre, où il était accompagné par Humboldt, qu'il fait une observation qui aura d'importantes conséquences. Elle fait l'objet d'une communication à l'Académie des sciences le 22 novembre 1824. Voici ce qu'il en dit à la fin de sa vie²³ :

« J'avais reconnu, en déterminant avec mon ami Alexandre de Humboldt l'intensité magnétique sur la pente de la colline de Greenwich, en 1822^c, que l'aiguille de déclinaison mise en mouvement atteint plus tôt le repos quand elle est placée dans sa boîte^d que quand elle est éloignée de tous corps étrangers. Cette remarque m'avait semblé devoir mener à des conséquences importantes sur la généralité des phénomènes magnétiques jusqu'alors circonscrits et comme isolés au milieu de la science. Je n'ai jamais cessé de me préoccuper de cet ordre d'idées, et aujourd'hui encore, alors que je ne vois plus et que je ne peux plus observer, il me semble que beaucoup de recherches sont encore à tenter dans la voie que j'ai ouverte, malgré l'explication en apparence satisfaisante qui a été donnée par Faraday d'une partie des phénomènes que j'ai découverts. »

Arago réalise en 1825 l'expérience simple représentée figure 5.15. Faisant tourner une plaque conductrice en dessous d'une aiguille aimantée « placée dans une cage de verre, et séparée de la plaque en mouvement par une membrane, pour la défendre de toutes les agitations de l'air », il voit que l'aiguille est entraînée dans le même sens de rotation que la plaque. Comme « l'horloge qui [donne] le mouvement [est] entièrement en cuivre », il ne peut s'agir que d'un phénomène nouveau, qu'Arago baptise *magnétisme de rotation*, puisque le disque crée visiblement du magnétisme



Figur 5.15. L'expérience d'Arago montrant le « magnétisme de rotation ». L'aiguille suspendue AB est séparée par une membrane CD du disque métallique tournant EF.

^c Arago était déjà présent en Angleterre, mais probablement sans Humboldt, en octobre 1821, pour les opérations de rattachement géodésique de la France et de l'Angleterre, puis est retourné en France. Il s'agit donc du deuxième voyage qu'il a fait pour terminer ce rattachement.

^d Cette boîte était probablement en laiton, mais Arago ne le dit pas.

capable d'entraîner l'aiguille. Le 7 mars 1825, il présente son expérience à l'Académie des sciences²⁴ :

« M. Arago met sous les yeux de l'Académie un appareil qui montre sous une forme nouvelle l'action que les corps aimantés et ceux qui ne le sont pas exercent les uns sur les autres. Dans ses premières expériences, M. Arago a prouvé qu'une lame de cuivre ou de toute autre substance solide ou liquide, placée au dessous d'une aiguille aimantée, exerce sur cette aiguille une action qui a pour effet immédiat d'altérer l'amplitude des oscillations, sans changer sensiblement leur durée. Le phénomène dont il a entretenu l'Académie est, pour ainsi dire, l'inverse du précédent. Puisqu'une aiguille en mouvement est arrêtée par une plaque en repos, M. Arago a pensé qu'il s'ensuivrait qu'une aiguille en repos serait entraînée par une plaque en mouvement. »

L'expérience d'Arago est facile à reproduire : on observe aisément la déviation de l'aiguille, qui peut entrer en rotation complète à condition de compenser au moins partiellement le champ magnétique terrestre par un aimant fixe. D'ailleurs Arago dit en 1850 : *« cet appareil est aujourd'hui dans tous les cabinets de physique »*, où l'on en trouve effectivement encore. L'année suivante, Arago remarque que l'entraînement de l'aiguille est beaucoup moins efficace si le disque est coupé par des fentes radiales.

À la même époque, Arago et Ampère montrent que l'expérience réussit si l'on remplace l'aiguille aimantée par un conducteur parcouru par un courant²⁵ :

« J'ai pensé, vers le commencement du mois d'août 1826, que mes expériences de rotation devaient être renouvelées en substituant des courants aux aiguilles magnétiques. N'ayant pas de pile, je priai mon ami Ampère de faire monter l'appareil dans le cabinet de physique du Collège de France.[...] Le fil s'ébranla presque à l'instant même où le plateau se mit à tourner. »

La théorie électromagnétique d'Ampère ne peut pas expliquer le magnétisme de rotation, et à vrai dire personne ne comprend ce phénomène considéré comme *« le plus mystérieux de l'époque »*²⁶. Il est considéré comme une découverte très importante, puisqu'il vaut à Arago en 1827 la médaille annuelle Copley de la Royal Society. Faraday écrit à ce sujet :

« J'ai toujours admiré la prudence et la réserve philosophique montrées par M. Arago en résistant à la tentation de

donner une théorie de l'effet qu'il avait découvert, [...] en refusant de donner son assentiment aux théories imparfaites d'autres savants. »

Controverses

Plusieurs savants reproduisent l'expérience, notamment John Herschel et Charles Babbage, le célèbre précurseur de l'informatique²⁷. Comme Arago, ils essayent de remplacer le disque métallique par des disques de substances non conductrices, mais il ne trouvent aucun effet alors qu'Arago avait vu un faible entraînement de l'aiguille. Brewster prétend même qu'il a fait le premier l'expérience, et la réplique d'Arago est cinglante.

Une expérience qui rappelle l'observation initiale d'Arago et Humboldt est aussi faite par deux savants italiens ; voici ce qu'en dit Arago, qui considère que leurs résultats sont erronés²⁸ :

« MM. Léopold Nobili et Bacelli, de Modène, ont fait osciller des aiguilles aimantées au-dessus de substances non métalliques [...] sans trouver de différence appréciable entre les oscillations que faisaient les aiguilles au-dessus des disques et hors de leur influence²⁹.

Si les physiciens de Modène avaient donné la distance qui séparait leur aiguille du plateau non métallique, et le nombre d'oscillations qu'ils ont comptées, je pourrais peut-être assigner la cause de l'erreur dans laquelle ils sont tombés ; tout ce que je puis faire, c'est d'opposer à leur dénégation des mesures exactes. »

Et pourtant nous savons bien aujourd'hui que Nobili et Bacelli ont raison contre Arago. Celui-ci montre une certaine mauvaise foi dans sa controverse. Il mentionne bien que Nobili et Bacelli ont reproduit l'expérience du magnétisme de rotation avec des disques de différents métaux et constaté que l'effet diminue du cuivre au zinc, au laiton, à l'étain et au plomb, « en accord avec Babbage et Herschel »^e.

^e Arago se plaint de ce que « son ami » Charles de Haldat, dans une brochure intitulée *Histoire du magnétisme dont les phénomènes sont rendus sensibles par le mouvement*, attribuée à Herschel et Babbage la découverte de ce que le magnétisme de rotation est moins efficace avec un disque fendu, alors que ceux-ci disent que leurs expériences ont été faites « after M. Arago » [souligné par celui-ci]. Voir CRAS 20 (1845) p. 1701-1702.

Mais il se garde bien de dire que les savants italiens, de même que Babbage et Herschel³⁰, n'ont observé aucun entraînement de l'aiguille avec des disques faits de diverses substances non conductrices, sauf quelquefois avec la cire d'Espagne où l'aiguille peut être entraînée sous l'effet d'électricité statique produite accidentellement.

Il est vrai qu'Arago a fait avant eux des expériences sur l'amortissement de l'aiguille aimantée par différentes substances. Il donne bien les résultats de ses « *mesures exactes* » avec beaucoup de détails, mais il ne dit pas grand chose des conditions dans lesquelles elles ont été faites, et son travail n'est pas, pour une fois, un modèle de rigueur scientifique^f. Lorsqu'il fait osciller une aiguille aimantée au dessus d'une surface, il la place si près (quelquefois à 0,7 mm) qu'elle est certainement amortie par la viscosité de l'air lorsqu'elle se trouve très proche de cette surface.

La découverte de l'induction

Quelle est « *l'explication en apparence satisfaisante* » de Faraday ? C'est tout simplement sa découverte de l'induction électromagnétique, qui date de 1831³¹. Faraday est depuis longtemps obsédé par l'idée qu'un courant électrique pourrait exciter un courant dans un conducteur. Superposant deux bobines, il fait passer un courant dans l'une d'elles en espérant, en vain, recueillir un courant dans l'autre. Il remarque cependant qu'un faible courant se produit temporairement dans la bobine secondaire quand il établit ou coupe le courant dans la bobine primaire. Peut-être mis sur la voie en apprenant que Joseph Henry a réalisé aux États-Unis un puissant électroaimant dont il peut inverser la polarité en changeant le sens du courant dans la bobine, Faraday construit alors un circuit magnétique fermé excité par une bobine primaire et muni d'une bobine secondaire. Cette fois, l'effet est très fort :

^f Babbage et Herschel disent d'ailleurs dans *Phil. Trans.* 115 (1825) p. 467-496 : « *D'après les affirmations vagues et les rapports imparfaits dont nous avons eu connaissance à propos des recherches de M. Arago, nous nous attendions à des effets magnétiques avec les corps non métalliques bien plus forts que ceux que nous avons observés... Nous aimerions apprendre de cet éminent physicien lui-même quels sont les moyens qu'il a employés pour rendre sensibles des forces aussi faibles...* »

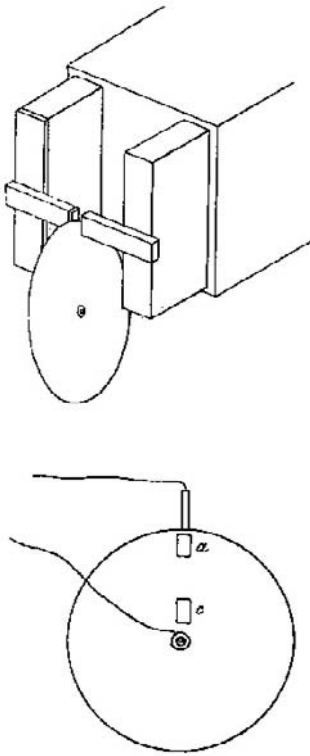


Figure 5.16. L'expérience de magnétisme de rotation de Faraday. Il fait tourner un disque de cuivre entre les pôles d'un fort aimant (en haut), et recueille le courant induit dans le disque à l'aide d'un balai, l'autre conducteur soudé sur l'axe s'y enroulant pendant l'expérience pour éviter un autre contact (en bas). Ce courant est détecté par un galvanomètre. Les rectangles a et c correspondent à deux positions des pôles de l'aimant.

il peut clairement observer l'apparition temporaire d'un courant dans cette bobine lorsqu'il ferme ou lorsqu'il ouvre le circuit primaire, et même l'apparition d'une petite étincelle : un courant électrique a donc été « induit » par la variation d'un autre courant, par l'intermédiaire d'un aimant (c'est le principe du transformateur). Faraday réalise alors toutes les expériences simples d'induction que nous connaissons aujourd'hui : il observe par exemple la création d'un courant temporaire dans une bobine creuse dans laquelle il enfonce un aimant.

Il lui est alors possible d'expliquer le magnétisme de rotation. Il réalise d'abord une expérience avec un fort aimant fixe devant lequel il fait tourner un disque de cuivre, et recueille les courants induits dans le disque (figure 5.16). Ayant compris grâce à diverses autres expériences que ces courants agissent sur l'aimant de façon à s'opposer au mouvement relatif, Faraday peut maintenant rendre compte de l'expérience d'Arago elle-même : le champ magnétique de l'aiguille aimantée induit dans le disque conducteur en rotation des courants (que l'on appellera plus tard les courants de Foucault). Ceux-ci créent à leur tour un champ magnétique⁸ qui agit sur l'aiguille en s'opposant au mouvement relatif. Il écrit :

« La force excitée en faisant tourner la plaque par rapport à l'aimant, ou l'aimant par rapport à la plaque, est une force répulsive [c'est-à-dire qui s'oppose au mouvement] : c'est probablement elle [qui produit] les effets que M. Arago a découverts. »

En réalisant son expérience préliminaire, Faraday a inventé la première machine capable de produire du courant électrique de façon continue : c'est la magnéto. Ce dispositif est l'inverse du moteur de Barlow (figure 5.13). Nous verrons plus loin les premiers développements pratiques de cette idée.

Arago s'obstine

Arago ne sera que partiellement convaincu par l'explication de Faraday. Sans doute n'a-t-il pas lu en détail son

⁸ Ici nous antcipons : Faraday ne parle pas de champ magnétique, une notion qu'il ne développera que bien plus tard. Mais il parle déjà de lignes de force.

étude très complète, où l'on voit que Faraday a expérimenté avec toutes sortes de substances et montré que seuls les corps bon conducteurs produisent le magnétisme de rotation. Arago écrit :

« Faraday, en 1832 [1831 en réalité], a fait voir le premier, en se servant d'un galvanomètre^h dont les fils étaient placés sur les différentes parties de disques métalliques mobiles au dessus desquels était un aimant fixe, qu'il y a, dans ces disques métalliques, des courants induits par l'aiguille aimantée, et on a pensé à tirer de là l'explication complète de tous les phénomènes que j'avais découverts. Je ne partage pas cette opinion. A la date du 25 septembre 1844, j'ai fait part de mes doutes au Bureau des longitudes. Voici ce que contient, à ce sujet, le procès-verbal de la séance :

« M. Arago rappelle les expériences qu'il a faites, il y a fort longtemps, sur les diminutions d'amplitude qu'éprouvent les oscillations d'une l'aiguille aimantée, quand ces oscillations s'opèrent à une petite distance d'une lame de verre, de glace (eau gelée) ou de la surface d'une couche liquide. M. Arago cite les circonstances de ses expériences, desquelles il résulte que, dans le cas particulier du verre, de la glace ou des liquides, le phénomène ne dépend pas d'une induction. »

Arago fait faire à la fin de sa vie, alors qu'il est presque aveugle, de nouvelles expériences par « ses amis, MM. Laugier et Barral ». Ces expériences, dont il donne un compte rendu détaillé à l'Académie le 7 mars 1853, sept mois avant sa mort, ne sont pas plus rigoureuses que les précédentes³². Il en conclut néanmoins :

« On reconnaîtra, j'espère, que mes expériences sont différentes de celles qui ont été imaginées par Faraday, et qu'elles ne peuvent s'expliquer complètement par la simple induction de courants fugitifs. »

Domage qu'il se soit ainsi bloqué !

^h Le galvanomètre, qui permet de mesurer des courants faibles, est inventé indépendamment en 1820, peu après la découverte d'Ørsted, par les allemands Johann Schweigger et Johann Christian Poggendorf ; ce dernier adapte en 1826 un petit miroir à la partie mobile de l'appareil, ce qui permet grâce à la réflexion d'un rayon lumineux de détecter et de mesurer très facilement son mouvement.

Faraday et le champ magnétique

Pendant ce temps, Faraday progresse par de nouvelles expériences et surtout de profondes réflexions. Il établit les lois de l'électrochimie, et montre que le courant est transmis dans un électrolyte par le déplacement de « molécules » ayant reçu une « exaltation » positive ou négative, que nous appelons aujourd'hui ions positivement ou négativement chargés. Il réalise d'ailleurs que cette « exaltation » requiert de l'énergie. C'est à cette époque qu'apparaît la nomenclature que l'on utilise aujourd'hui en électrochimie : Faraday crée lui-même le terme d'*électrode*, tandis que ceux de *cathode*, *anode*, *électrolyse*, *électrolyte*, *anion* et *cation* sont principalement dus à William Whewell.

Cependant le plus grand titre de gloire de Faraday est l'introduction de la notion de champ pour rendre compte des actions à distance. Cette idée apparaît à la suite de ses études sur le magnétisme. Faraday ne connaît toujours pas la cause du magnétisme, mais il énonce un point fondamental, dont on peut trouver le germe dans ses idées sur les lignes de force que nous avons mentionnées plus haut : la manifestation du magnétisme se produit dans le milieu qui entoure l'aimant ou le courant électrique, et l'énergie du système réside dans ce milieu, et non dans l'aimant ou le courant lui-même. Il le montre en traçant à l'aide de limaille de fer les lignes de force autour d'un aimant (figure 5.17), et aussi en observant que ces lignes de force magnétiques se concentrent dans une substance ferromagnétique ou paramagnétique (figure 5.18), et au contraire divergent dans une substance diamagnétique. Il dit, tout en reconnaissant que c'est spéculatif³³ :

« Tous les phénomènes [...] me paraissent montrer l'existence physique d'une atmosphère de puissance [atmosphere of power] autour d'un aimant. [...] Mon idée est que lorsqu'un aimant est dans l'espace libre il existe un tel milieu (en termes magnétiques) autour de lui. Les résultats expérimentaux montrent de façon manifeste que le vide a [alors] ses propres propriétés d'attraction et de répulsion. »

Faraday propose qu'il en soit de même pour les systèmes de charges électriques ou les systèmes de masses, introduisant ainsi le champ électrique et le champ de gravitation. Il s'arrêtera là, en ayant conscience d'avoir touché quelque chose de fondamental³⁴ :

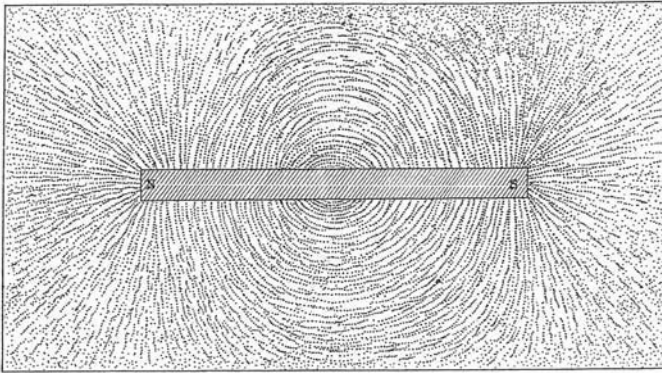


Figure 5.17. Lignes de force du champ magnétique d'un aimant. Faraday les matérialise grâce à la limaille de fer.

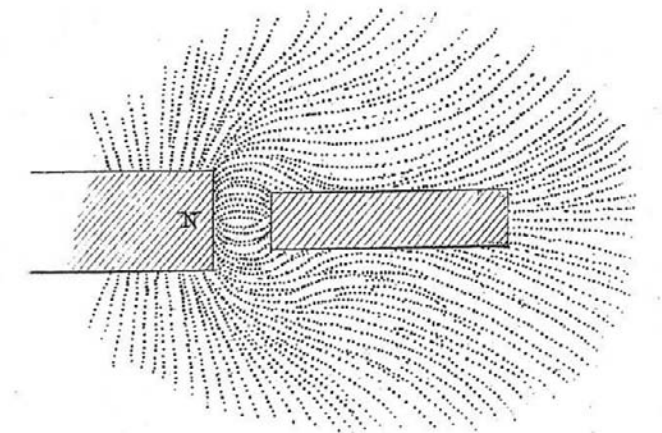


Figure 5.18. Action d'un morceau de fer sur les lignes de force magnétiques. Grâce à la limaille de fer, Faraday constate qu'elles se resserrent dans le fer et au voisinage.

« Je maintiens mon opinion [sur les lignes de force] bien qu'avec quelque hésitation, comme je ne puis qu'en avoir concernant les sujets les plus profonds de la science, comme l'existence d'un ou deux fluides électriques, ou la nature réelle de la lumière, ou la nature de l'attraction, y compris celle de la gravité elle-même, ou la nature de la matière en général. »

Cette conception révolutionnaire est à la base de l'œuvre accomplie par son élève James Clerk Maxwell dans les années 1850 et 1860. Voici ce qu'il dit de la conception de Faraday³⁵ :

« [Faraday] conçoit l'espace entier comme un champ de force, où les lignes de force sont généralement courbes ; celles qui sont dues à un corps s'étendent dans tous les sens à partir de ce corps, et leur direction est modifiée par la présence d'autres corps. »

Il n'est pas étonnant que ce concept, si contraire aux idées des newtoniens de Laplace à Ampère, ait eu quelques difficultés à s'imposer.

Élucubrations et découvertes autour de l'électricité

Les lignes qui précèdent peuvent donner l'impression que l'histoire des débuts de l'électromagnétisme s'est déroulée de façon linéaire. En réalité, il n'en est rien : si ce sont les génies que sont Ørsted, Ampère et Faraday l'ont fait progresser, la littérature scientifique est pleine d'articles décrivant des propriétés supposées de l'électricité et des expériences quelquefois intéressantes mais mal interprétées. Le magnétisme de rotation en est un exemple, qui a eu au moins le mérite d'aider Faraday à concevoir l'induction. Il serait trop long de résumer toutes ces élucubrations, dues entre autres aux De La Rive et aux Becquerel. Quoi de plus normal, cependant, à une époque qui voit naître d'un seul coup toute la physique classique ?

Il faut cependant citer plusieurs découvertes importantes faites à cette époque : celle des lois fondamentales des circuits électriques, établies par l'allemand Georg Simon Ohm vers 1827 et complétées par le français Claude Pouillet³⁶, et la découverte de la thermoélectricité. Celle-ci est due à l'estonien Thomas Johann Seebeck, qui observe en 1821 qu'une différence de potentiel s'établit entre les extrémités d'une barre de métal soumise à un gradient de température. Fermant le circuit avec un autre métal, il constate qu'un faible courant peut alors être détecté avec un galvanomètre, courant proportionnel à la différence de température entre les deux jonctions³⁷. Il a ainsi réalisé une paire de thermocouples, que l'on utilisera bientôt pour mesurer des différences de températuresⁱ. Treize ans plus tard, Jean Charles Peltier, un horloger français, découvre l'effet auquel on a donné son nom, qui est l'inverse de celui découvert par Seebeck : faisant passer un courant dans un circuit formé de deux métaux différents, il observe que

ⁱ La découverte de l'effet thermoélectrique a été aussi attribuée à Fourier, à Ørsted et à un luxembourgeois, le Général-Major Baron van-Zuylen-van-Nyevelt : voir *BUG* 23 (1823) p. 50 et 259. Mais la priorité de Seebeck ne paraît pas devoir être mise en doute.

l'une des jonctions se refroidit tandis que l'autre s'échauffe. Cette propriété sera plus tard mise à profit pour réfrigérer de petits objets. Enfin on ne peut oublier la découverte déjà mentionnée du diamagnétisme et du paramagnétisme par Faraday lui-même (découverte entrevue par Becquerel en 1821), et de la polarisation rotatoire magnétique, l'*effet Faraday*³⁸.

Quelques-unes des premières applications de l'électricité³⁹

L'intérêt considérable provoqué par la découverte de la pile électrique, puis de l'électrodynamique, n'a pas manqué de susciter un très grand nombre de recherches pures, dont les résultats ne méritent guère de passer à la postérité à l'exception de celles que nous venons de citer. Mais il y a aussi des applications en nombre croissant. Nous ne parlerons pas ici de l'électrochimie ni de la galvanoplastie, mais d'applications à caractère physique car ce sont surtout elles qui retiendront l'attention d'Arago. En ce qui concerne la thermoélectricité, le thermocouple devait être beaucoup utilisé, par exemple pour mesurer la variation de la température avec la profondeur dans le lac de Genève⁴⁰ ou la température du corps de l'homme et des animaux⁴¹.

Le télégraphe électrique

Dès les débuts des recherches sur l'électricité, on pense qu'elle pourrait servir à transporter de l'information à distance⁴². Par exemple, le polonais Samuel Thomas Sœmmering imagine en 1811 un télégraphe où l'on aurait observé une électrolyse dans des récipients correspondant chacun à une des lettres de l'alphabet, électrolyse qui se serait produite lorsqu'un opérateur à l'autre extrémité aurait fermé le circuit électrique correspondant. Ce dispositif ne risque pas de supplanter le télégraphe optique de Claude Chappe, qui est alors en plein développement (figure 5.19) ! Cependant le télégraphe de Chappe nécessite la construction de nombreuses stations munies chacune d'un opérateur, ne peut fonctionner que de jour par bonne visibilité et n'est pas très rapide : on cherche donc à le remplacer par un système plus pratique.

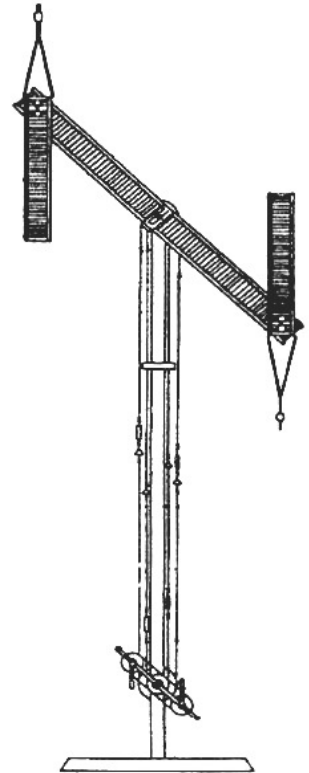


Figure 5.19 : le télégraphe de Chappe. Les bras peuvent être orientés par des poulies dans diverses positions, qui représentent des lettres.

Cette possibilité se présente en 1820. Trois semaines après l'annonce par Arago de la découverte d'Ersted, Ampère écrit⁴³ :

« D'après le succès de cette expérience, on pourrait, au moyen d'autant de fils conducteurs et d'aiguilles aimantées qu'il y a de lettres, et en plaçant chaque lettre sur une aiguille différente, établir, à l'aide d'une pile placée loin des aiguilles, et qu'on ferait communiquer alternativement par ses deux extrémités à celles de chaque fil conducteur, une sorte de télégraphe propre à écrire tous les détails qu'on pourrait transmettre, à travers quelques obstacles que ce soit, à la personne chargée d'observer les lettres placées sur les aiguilles. En établissant sur la pile un clavier dont les touches porteraient les mêmes lettres, et établiraient la communication par leur abaissement, ce moyen de correspondance pourrait avoir lieu avec assez de facilité, et n'exigerait que le temps nécessaire pour toucher d'un côté et lire de l'autre chaque lettre. »

Rappelant que la « vertu magnétique » d'un courant est très forte si le fil est enroulé en spirale, Arago suggère de son côté que cette « augmentation de force » doit permettre d'utiliser à distance un courant faible grâce à un électroaimant pour actionner un appareil enregistreur, et donc de construire un télégraphe électrique. L'idée est donc dans l'air, mais il faut la mettre en pratique.

Les progrès seront lents. Ce n'est qu'en 1834 que Gauss et Weber, respectivement spécialistes du magnétisme et de l'électricité, construisent à Göttingen le premier télégraphe qui ait réellement fonctionné, sur 1 km de long, entre l'observatoire dirigé par Gauss et le laboratoire de physique de Weber. On peut supposer qu'ils utilisaient l'action du courant sur une aiguille aimantée.

Par la suite, bien qu'on connaisse l'électroaimant, on emploiera pendant longtemps des galvanomètres sans fer du type de celui de la figure 5.8 pour détecter le courant ; leur réponse est lente et ils ne permettent pas d'inscrire un signal sur du papier. En 1837, Richtie et Alexander essayent à Edimbourg un télégraphe comportant 30 fils de cuivre (doubles pour le retour du courant) correspondant à 30 lettres et signes. Plus astucieux, le télégraphe de Schilling à Saint-Petersbourg (1832) ne comporte que 5 paires de fils de platine (!) correspondant à 5 chiffres, les lettres à transmettre étant codées par plusieurs de ces chiffres. Celui de Wheatstone en 1837 est basé sur le même

principe. Le premier télégraphe à être essayé sur une distance de plusieurs kilomètres est celui qui est construit la même année à Munich par l'astronome et constructeur d'instruments Steinheil⁴⁴. Il permet d'enregistrer les signaux sur une bande de papier déroulante, en utilisant l'électroaimant. Steinheil a le mérite de reconnaître que le retour du courant peut se faire par la terre, divisant par deux le nombre de fils nécessaires.

C'est cependant l'américain Samuel Morse qui construit le premier télégraphe pratique. Ses premiers essais, qui utilisent d'emblée l'électroaimant, datent de 1832⁴⁵. Dans la version finale de 1840, la personne qui émet dispose d'un manipulateur très simple (figure 5.20), et le signal reçu est enregistré sur une bande de papier (figure 5.21). Grâce à un codage des lettres par signaux courts et signaux longs (le fameux alphabet Morse, qui était encore en usage il y a quelques années), un seul conducteur suffit. La première ligne télégraphique régulière est installée en 1844 entre Washington et Baltimore, puis prolongée en 1845 jusqu'à Boston. En 1852, on compte déjà 19 000 km de lignes télégraphiques aux États-Unis. Le télégraphe électrique connaît également un développement rapide en Angleterre.

Malgré les efforts d'Arago, que nous retrouvons en 1842 prônant devant la Chambre le télégraphe électrique et décrivant les succès obtenus en Angleterre, le développement sera moins rapide en France. En effet, on y voit non sans raison une concurrence au télégraphe Chappe, maintenant très développé⁴⁶ ; on craint aussi que les lignes électriques ne soient détruites par malveillance, et le physicien Pouillet, qui a alors une grande

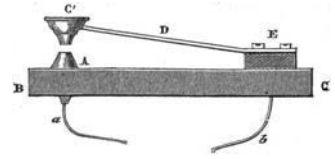


Figure 5.20. Le manipulateur du télégraphe de Morse.

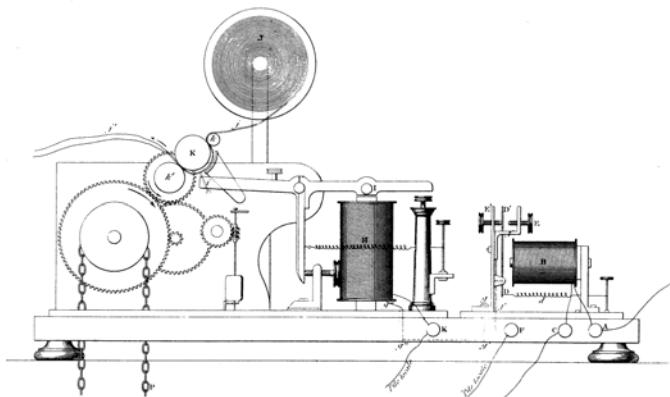


Figure 5.21. Le récepteur du télégraphe de Morse. Le faible courant électrique arrivant actionne un premier électroaimant B qui sert de relais (à droite). Celui-ci ferme le circuit de l'électroaimant H alimenté par une pile locale. Ce électroaimant attire un levier muni d'un stylet qui inscrit un trait sur un ruban de papier qui se déroule sur le cylindre K. Le ruban est entraîné par un mouvement d'horlogerie à poids.

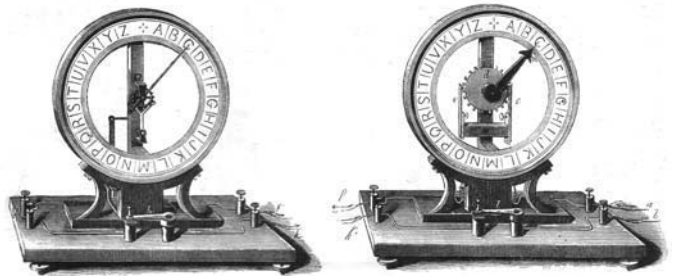


Figure 5.22. Louis Breguet (1804-1883).

influence politique, est très réticent. Finalement c'est grâce aux chemins de fer que le télégraphe sera réalisé : il y a là un besoin évident, et les voies ferrées sont suffisamment surveillées pour que les sabotages soient peu probables sur les lignes télégraphiques qui les longeraient. Un crédit de 240 000 F est attribué le 23 novembre 1844 par ordonnance royale pour établir une ligne télégraphique entre Paris et Rouen le long du chemin de fer. Le constructeur d'instruments Louis Breguet (figure 5.22) est chargé de diriger les travaux : le 18 mai 1845, ils sont terminés et les premières dépêches envoyées. Breguet a inventé à cet effet un système qui transmet l'information lettre par lettre (figure 5.23) à une vitesse d'ailleurs comparable à celle du télégraphe de Morse (une centaine de lettres par minute). Bien que plus fragile que ce dernier, il sera assez longtemps utilisé sur certaines lignes de chemin de fer.

Par ailleurs, Wheatstone construit en 1845, le long de la ligne de chemin de fer de Paris à Versailles (rive droite) et au début de la ligne de Paris à Orléans, un télégraphe assez semblable à celui de Breguet. On envisage ensuite une ligne de Paris à Lille, avec des embranchements vers Douai et Valenciennes ; un crédit de près de 500 000 F est attribué en juillet 1846, mais on veut cette fois que le télégraphe électrique reproduise les signaux du télégraphe optique de Chappe, ce qui est bien restrictif. Alphonse Foy, administrateur en chef des télégraphes, et Louis Breguet y parviennent, mais cela nécessite deux conducteurs et ne permet pas l'enregistrement. Ce système est abandonné en 1852 au profit du télégraphe à cadran de Breguet, remplacé deux ans après par celui de Morse. Morse recevra pour ses travaux une somme de 400 000 F, à laquelle la France contribuera pour 144 000 F. Quant au télégraphe

Figure 5.23. Un télégraphe à cadran de Breguet. Dans ce modèle de 1852 construit par Froment, très utilisé dans les chemins de fer, le transmetteur (à droite) envoie autant d'impulsions que de lettres parcourues lorsqu'on tourne l'aiguille. Grâce à un système d'électroaimant et de cliquets, l'aiguille réceptrice (à gauche) avance d'autant, si bien qu'après un réglage initial émetteur et récepteur indiquent toujours la même lettre.



de Chappe, il servira pour la dernière fois en Crimée le jour de la prise de Sébastopol, le 8 septembre 1855.

Initialement privé, le télégraphe est ouvert au public en 1851 avec un très grand succès. Dès la fin de cette année, un câble télégraphique sous-marin long de 41 km relie la France et l'Angleterre (figure 5.24) ; il sera utilisé en 1854 pour synchroniser les horloges à Paris et à Greenwich dans le but d'améliorer la détermination de la différence de leurs longitudes (voir le chapitre suivant). On voit bientôt apparaître dans chaque grande ville un bureau télégraphique comme celui qui est représenté figure 5.25, où de nombreux manipulateurs, tous masculins au début, émettent et reçoivent les messages dans une ambiance sévère.

Les moteurs électriques

Les premiers moteurs électriques vraiment fonctionnels suivent de peu les expériences de Faraday, de Barlow et d'autres dont nous avons parlé précédemment. Aucun de ces moteurs, qui n'utilisent pas l'induction, n'aura d'avenir. En 1834, un savant allemand travaillant à Saint-Petersbourg, Moritz-Hermann von Jacobi, un des inventeurs de la galvanoplastie, propose un moteur où des pièces de fer doux sont attirées par des électroaimants, lesquels viennent d'être utilisés pour la première fois par Morse pour ses récepteurs de télégraphe. Il s'agit d'un appareil rotatif où un commutateur monté sur l'arbre permet d'alimenter tour à tour des électroaimants fixes de façon à ce qu'ils attirent les pièces de fer dans le sens de la rotation. Ce moteur, qui fournit environ 3/4 de cheval-vapeur, est installé en 1839 sur un petit bateau qui parvient à remonter le courant de la Neva pendant plusieurs heures. Mais le succès est mitigé en raison des émanations d'oxyde d'azote par les piles, qui incommode fortement les opérateurs. Un autre essai est fait en 1842 par Davidson en Écosse, dont le moteur entraîne une locomotive avec un wagon de 6 tonnes sur un petit parcours. De son côté, l'américain Patterson réalise un moteur sur le même principe, importé par Andelle à Paris en 1840⁴⁷. De toute façon, les piles coûtent très cher, ce qui réduit à néant l'intérêt commercial des moteurs électriques : pendant quelques décennies, ils ne serviront plus qu'à des démonstrations de laboratoire, ou occasionnellement à des usages pratiques limités.

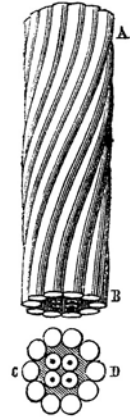


Figure 5.24. Le premier câble sous-marin. 4 conducteurs isolés au gutta-percha et entourés d'étoupe goudronnée sont entourés d'une armature de fils de fer galvanisés tordus en hélice.

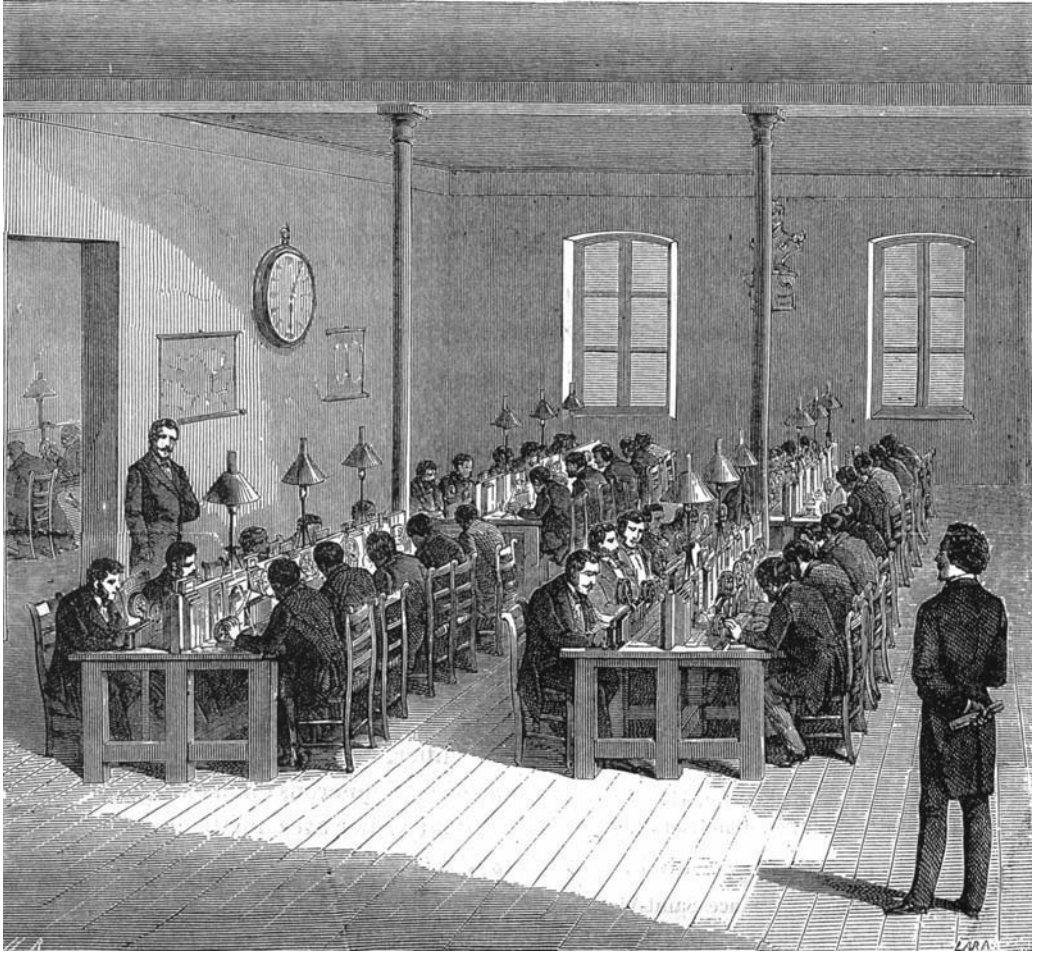


Figure 5.25. Une salle des opérateurs télégraphiques à Paris dans les années 1860.



Figure 5.26. Gustave Froment (1815-1865).

Un autre type de moteur utilise des bobines creuses contenant un barreau de fer sur la moitié de leur longueur, et dans lesquelles plonge un autre barreau de fer qui est attiré par le premier lorsque le courant passe dans la bobine. Avec deux bobines alimentées alternativement par un commutateur et en montant les deux barreaux mobiles sur un balancier, on peut obtenir un mouvement alternatif qu'il faut ensuite transformer en rotation avec une bielle, comme dans une machine à vapeur. Aux États-Unis, Joseph Henry invente un moteur de ce type dit « *rocker arm* » (à bras oscillant), suivi par d'autres.

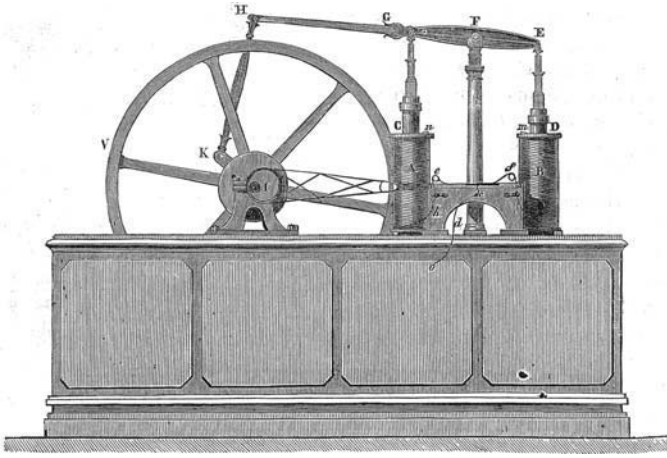


Figure 5.27. Un moteur électrique alternatif de Froment construit vers 1860 par Bourbouze pour la Faculté des sciences de Paris. Les électroaimants A et B, dont la partie basse contient un cylindre de fer doux, sont alimentés alternativement en courant électrique par les contacts e et f actionnés par l'excentrique I. Les cylindres de fer plongeurs C et D sont donc attirés alternativement ce qui meut le balancier EFG, lequel fait tourner le volant grâce à la bielle HK. Les bobines C et D sont doubles, perpendiculairement au plan de la figure, de manière à réaliser un circuit magnétique presque fermé lorsque les cylindres plongeurs sont en position basse.

En France, c'est le constructeur Gustave Froment (figure 5.26) qui domine le marché des moteurs électriques. Il construit des moteurs des deux types à partir de 1844. La figure 5.27 montre à titre d'exemple un moteur à bras oscillant destiné à la Faculté des sciences de Paris vers 1860. Froment produit également de petits moteurs rotatifs (figure 5.28). En superposant une dizaine de moteurs de ce genre, Froment construit de grands moteurs verticaux (figure 5.29). Mais ces moteurs tomberont vite en désuétude en raison du coût des piles, et aussi parce que les commutateurs sont rapidement détruits par les étincelles qui se produisent à chaque ouverture du circuit électrique¹ : on ne trouve plus que quatre moteurs électriques à l'Exposition universelle de 1867 à Paris⁴⁸. Mais la situation va changer avec l'apparition de la dynamo de Gramme.

Magnétos et dynamos

Aussitôt après que Faraday ait montré que l'on pouvait produire un courant au moyen d'un aimant, on se met à

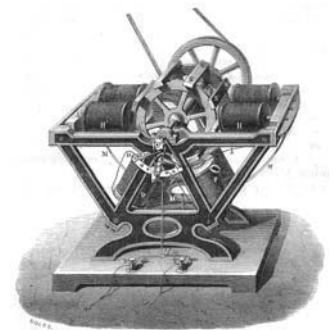


Figure 5.28. Ce moteur comporte quatre paires de bobines, au lieu de trois sur celui qui est photographié en page de titre de ce chapitre.

¹ Ces étincelles dites extra-courants de rupture sont un effet d'auto-induction découvert par Joseph Henry et bien étudié par Faraday. Toute l'énergie emmagasinée dans la bobine est évacuée par l'étincelle à l'ouverture du circuit. On n'a pas encore trouvé vers 1860 le moyen de remédier à ce phénomène gênant ; peut-être ignore-t-on que Fizeau a résolu le problème en branchant un condensateur en parallèle (CRAS 36 (1853) p. 418-421). Mais ce condensateur primitif est bien encombrant.

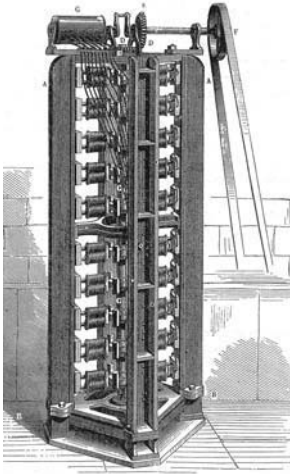


Figure 5.29. Un grand moteur électrique de Froment. Il est constitué d'une superposition de moteurs analogues à celui de la figure 5.28, mais dont les paires de bobines sont disposées à 120° les unes des autres.

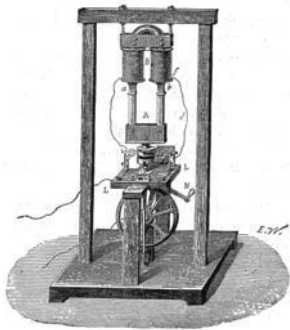


Figure 5.30. La magnéto de Pixii. Elle comporte deux aimants permanents rectilignes A que l'on fait tourner grâce à une manivelle devant une pièce de fer doux en fer à cheval munie de deux bobines B. Un courant alternatif y est produit, que l'on redressait grâce au commutateur visible sur l'axe.

espérer que l'on pourrait ainsi remplacer les piles et on s'efforce de construire des machines utilisables en pratique. La première, qui date de 1832, est celle d'Antoine Hippolyte Pixii (figure 5.30). Elle utilise l'induction produite par des aimants permanents mobiles dans des bobines fixes où le courant est engendré. Ce type d'appareil, appelé *machine magnéto-électrique*, puis en abrégé *magnéto*, est encore en usage pour l'éclairage des bicyclettes. Dans la magnéto de l'anglais Henry Hyde Clarke (figure 5.31), l'aimant permanent est fixe et ce sont les bobines qui tournent. L'une et l'autre de ces magnétos fournissent un courant alternatif dont on ne voit pas alors l'usage : on le redresse avec un commutateur monté sur l'axe de rotation, ce qui a l'inconvénient, comme dans le cas des moteurs, que les contacts se détériorent rapidement. Qui a l'idée de remplacer ce commutateur par un collecteur à nombreuses lames connectées à de nombreux circuits électriques distincts, ce qui diminue d'autant les étincelles à l'ouverture de chaque circuit ? Certains prétendent que c'est Breguet, mais c'est peu probable car on ne voit de collecteur multi-lames dans aucune de ses réalisations. L'ingénieur belge Zénobe Gramme, qui construit vers 1869 des magnétos semblables à celle de Clarke mais munies de tels collecteurs, en est plus probablement l'inventeur.

Gramme travaille dans la compagnie parisienne *L'Alliance*, dirigée par un certain Auguste Berlioz, qui ne semble pas avoir de lien avec le compositeur. Un physicien de Bruxelles, Florise Nollet, avait cherché en 1849 à augmenter les effets de la machine de Clarke, travail repris à sa mort par Joseph van Malderen et qui aboutit à la célèbre magnéto Alliance (figure 5.32 et 5.33). Mue par une petite machine à vapeur ou par le moteur à explosion à gaz inventé par Lenoir en 1860, elle servira pendant quelques années à alimenter l'arc électrique qui produit la lumière de certains phares ; mais on y renoncera assez vite en raison des difficultés qu'il y a à faire fonctionner et à entretenir cet équipement dans des lieux isolés.

La machine électromagnétique de l'anglais Henry Wilde (figure 5.34) représente un gros progrès par rapport à la machine de Clarke ou à la magnéto Alliance. En effet, l'aimant permanent y est remplacé par un électroaimant alimenté par une petite magnéto auxiliaire, ce qui fournit un champ magnétique bien plus fort et donc un courant bien plus intense, et le rotor est mieux conçu (figure 5.35).

En 1867, l'allemand Werner von Siemens, et indépendamment Charles Wheatstone, s'aperçoivent que le fer qui entre dans la construction des électroaimants garde une faible aimantation rémanente. La rotation de quelques tours de bobine en face des électroaimants suffit pour induire dans ce rotor un faible courant : si on l'utilise pour alimenter en dérivation ces électroaimants, il y produit une aimantation plus forte. Par ce processus en cascade, le courant produit est d'autant plus intense que la vitesse est plus grande. La machine auto-excitatrice, que l'on baptise *dynamo-électrique* ou plus simplement *dynamo*, est née. La première dynamo employée dans

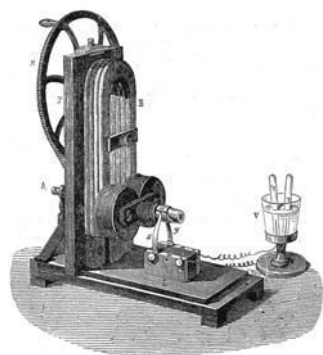


Figure 5.31. La magnéto de Clarke. Deux bobines sont entraînées par une manivelle devant un grand aimant en fer à cheval fixe B. Le courant produit, redressé par le commutateur bien visible sur l'axe, sert ici à une expérience d'électrolyse, l'usage le plus commun de ces petites magnétos.

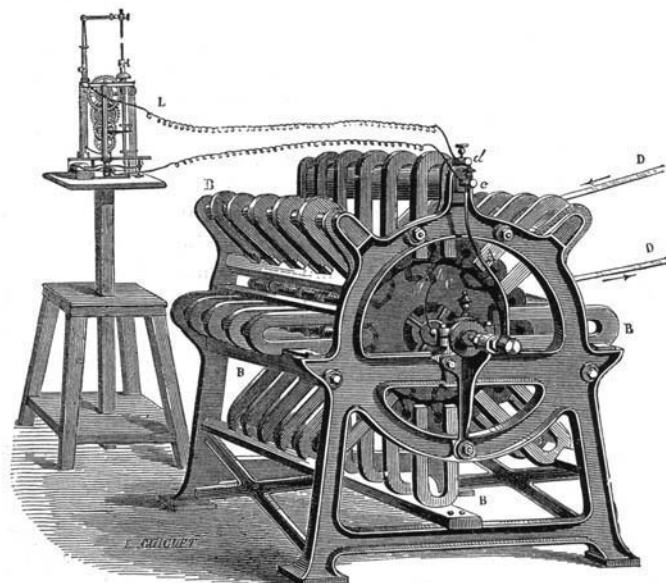


Figure 5.32. La magnéto Alliance. C'est la combinaison de magnétos de Clarke, dont on voit les nombreux aimants fixes en fer à cheval. Le rotor comporte de nombreuses bobines (figure 5.33) montées selon les besoins en série ou en parallèle, qui passent entre les pôles de ces aimants (les pôles Sud et Nord de ces aimants alternent le long d'une série). Il est entraîné par une courroie D. Lorsque la magnéto sert à alimenter un arc électrique, comme ici, il n'est pas nécessaire de redresser le courant qui est simplement recueilli par des balais frottant sur deux bagues. Sinon, un collecteur comme celui de Gramme est nécessaire. La magnéto alimente un arc électrique, muni d'un régulateur de Victor Serrin (vers 1860).

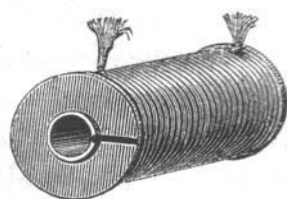


Figure 5.33. Une des bobines de la magnéto Alliance.

la pratique est celle de Gramme, construite en 1870. La figure 5.36 représente un modèle perfectionné pesant 4,3 tonnes, qui fournit 187 ampères sous 210 volts.

En 1873, un ingénieur français, Hippolyte Fontaine, découvre par hasard, en montant à Vienne en Autriche l'*Exposition d'électricité*, qu'une dynamo alimentée en courant électrique se met à tourner et se transforme donc en moteur : il montre ainsi par l'expérience la réversibi-

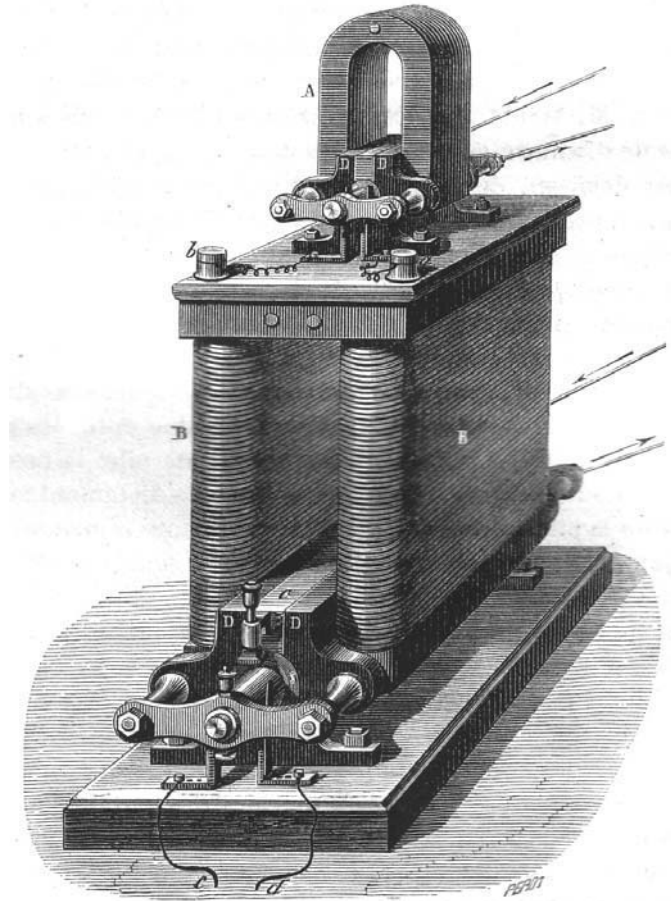


Figure 5.34. La dynamo de Wilde. Une magnéto auxiliaire, au dessus, alimente l'électroaimant de la dynamo. Le rotor (figure 5.35) est entraîné par une courroie ; une autre courroie entraîne le rotor de la magnéto auxiliaire.

lité de la dynamo. Il connecte alors une dynamo génératrice et ce moteur par des conducteurs de mille mètres de long, transportant ainsi une énergie considérable. Deux problèmes sont résolus à la fois : le transport de l'énergie

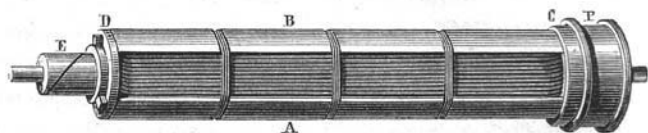


Figure 5.35. Le rotor de la dynamo de Wilde, conçu par Siemens. Il est constitué de fils placés longitudinalement sur un noyau de fer doux.

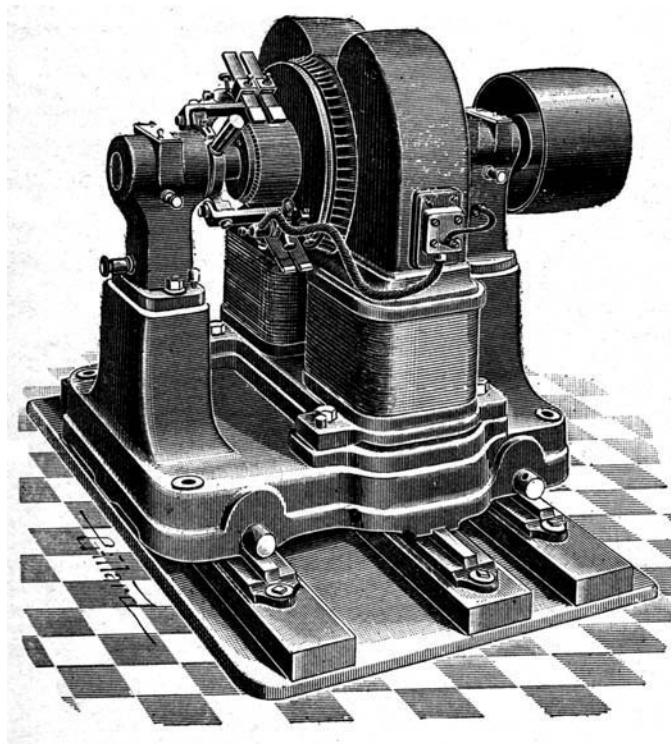
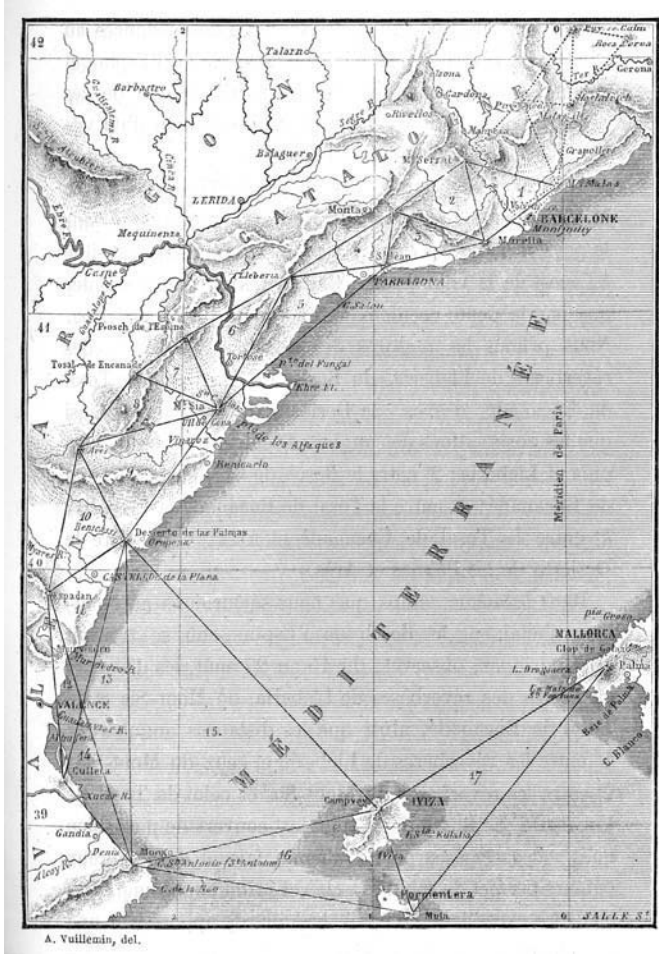


Figure 5.36. Une dynamo de Gramme (« type supérieur »). Les deux électroaimants rectangulaires sont alimentés par le courant produit par la machine elle-même, en dérivation sur le courant recueilli par des balais sur le collecteur visible à gauche. Le rotor, qui passe entre les gros pôles de l'électroaimant, est un bobinage beaucoup plus complexe que celui de la figure 5.35, enroulé sur un noyau de fer doux feuilleté. La poulie, à droite, est entraînée par une machine à vapeur, un moteur à explosion, ou une turbine hydraulique.

à distance et la découverte d'un moteur électrique véritablement pratique et puissant (ce type de moteur est toujours utilisé aujourd'hui). C'est le début d'une nouvelle ère. Il reste encore à éviter les pertes dans le transport de l'électricité en construisant des lignes à haute tension, ce qui nécessite l'utilisation du courant alternatif, donc d'alternateurs et de transformateurs, et aussi de moteurs capables de fonctionner avec ce type de courant alternatif : c'est l'américain d'origine yougoslave Nikola Tesla qui concevra l'essentiel des principes qui seront mis en œuvre pour cela.

Chapitre 6

La mesure de la Terre



La triangulation de Biot et Arago en Espagne.

Les triangulations avant Arago

Les origines

Depuis l'antiquité, les hommes se sont attachés à mesurer des distances et des surfaces sur la Terre. C'était une nécessité en Égypte, puisque la crue annuelle du Nil recouvrait de limon toutes les terres arables et qu'il fallait restituer à chacun son champ lorsque le fleuve s'était retiré : les premiers géomètres étaient donc Égyptiens, et, semble-t-il, passablement habiles. Les Romains, quant à eux, créèrent un corps d'*agrimensores*, les mesureurs de champs. Mais il fallut attendre le ^{xii}e siècle pour que de nouvelles mesures de ce genre, aboutissant à un cadastre, fassent leur apparition dans le Dauphiné puis se répandent progressivement dans les autres provinces.

Mesurer de grandes distances était une tout autre affaire. Jusqu'au ^{xviii}e siècle, les dimensions des continents et des mers étaient estimées d'après les temps de trajet, et les cartes étaient très inexactes. En 1518, Jean Fernel, le médecin d'Henri II, reprenant une idée d'Ératosthène, mesure la distance de Paris à Amiens en comptant le nombre de tours de roue d'une voiture, et obtient ainsi la première valeur relativement précise de la longueur correspondant à une différence de latitude de 1°, soit 56 747 toises (environ 110 km). Les longueurs sont alors données en toises, mesurant environ 195 cm^a. Une nouvelle technique, la *triangulation*¹, est inventée par Frisius en 1533, puis utilisée par Tycho Brahe pour relier l'île de Hven où se trouve son observatoire à la côte du Danemark. Snellius, qui avait établi la loi de la réfraction, mesure ainsi en 1615-1617 la longueur d'un méridien entre Alkmaar et Berg-op-Zoom aux Pays-Bas, et Giambattista Riccioli fait une mesure similaire en Italie. Les résultats sont peu précis car la technique est assez mal conçue. C'est l'astronome Jean Picard qui développera au ^{xviii}e siècle les bases pratiques de la méthode de mesure, lesquelles seront utilisées sans grand changement pendant trois siècles. Le principe de la triangulation est très simple, même si sa réalisation ne l'est pas nécessairement (encadré 6.1).

^a La toise comporte 6 pieds de 12 pouces chacun. Le pouce français, mesurant 27,07 mm, est donc plus grand que le pouce anglais. Il est divisé en 12 lignes, donc il y a 864 lignes dans une toise.

Encadré 6.1. Principe de la triangulation

On mesure avec des règles ou des chaînes la longueur d'une base AB (figure 6.1). Puis, considérant un autre point C, par exemple un clocher, on mesure les angles a et b , ce qui nécessite que la visée réciproque soit possible pour les sommets du triangle ABC. Celui-ci est alors complètement défini et on peut calculer la longueur BC, qui sert de base au triangle BCD, etc. Certains triangles sont redondants, ce qui permet des vérifications. Les erreurs de mesure s'accumulent, mais la précision sur la mesure des angles peut être excellente. Il faut en principe tenir compte de la différence relative d'altitude entre les points, en mesurant par exemple depuis A la hauteur angulaire de C par rapport à l'horizontale, définie avec un niveau à bulle ; mais cela ne sera fait systématiquement qu'à la fin du XVIII^e siècle. Des observations astronomiques permettent de connaître l'orientation par rapport au Nord (l'azimut) de la base ou d'un des côtés des triangles, ce qui est nécessaire quand on veut mesurer un arc de méridien.

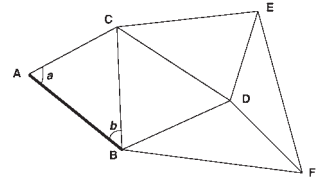


Figure 6.1. Principe de la triangulation.

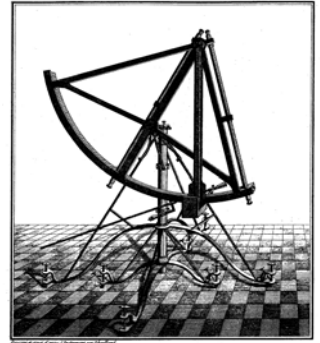


Figure 6.2. Un quart de cercle de Picard. Destiné à la mesure des angles pour la triangulation, le quart de cercle est inclinable dans toutes les orientations.

La longueur du degré et la figure de la Terre

Peu après la fondation de l'Observatoire de Paris en 1667, Picard mesure un arc du méridien de Paris sur les instructions de l'Académie². La base de la triangulation, longue d'environ 11 kilomètres entre Villejuif et Juvisy, est mesurée en plaçant bout à bout des règles de bois de deux toises (environ 4 mètres) de long. La triangulation s'étend de Sourdon près d'Amiens jusqu'à Malvoisine près de la Ferté-Alais, soit 153,5 kilomètres. La latitude est déterminée aux extrémités avec un nouvel instrument, le *secteur astronomique*, et toute la triangulation est faite avec des quarts de cercles orientables dont un exemple est représenté figure 6.2. On peut alors calculer la longueur de l'arc correspondant à une différence de latitude de un degré : Picard obtient 57 060 toises, soit un peu plus de 111 km. Puis, en multipliant par 360, on obtient la circonférence de la Terre, alors supposée sphérique. C'est la première fois que les dimensions de la Terre sont déterminées avec précision.

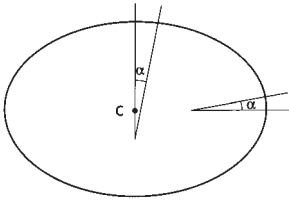


Figure 6.3. La différence de latitude entre deux lieux est l'angle α entre les verticales, qui sont perpendiculaires à la surface de la Terre mais ne se croisent pas en général au centre C de la Terre puisqu'elle n'est pas sphérique. L'arc sous-tendu par le même angle α est plus long vers les pôles. L'aplatissement de la Terre

Quelque temps après, on se préoccupe de savoir si la Terre est aplatie ou allongée le long de son axe de rotation. Newton avait prédit que si la Terre était fluide, elle devrait être aplatie aux pôles sous l'effet de la force centrifuge. On s'attend donc à ce que la longueur de l'arc correspondant à une même différence de latitude ne soit pas constante, mais soit fonction de la latitude. C'est pourquoi on effectue d'autres triangulations le long du méridien (on disait alors *la méridienne*) de Paris. Jean-Dominique Cassini et Philippe de La Hire commencent en 1683 une triangulation de Paris à Collioure, qui sera continuée en 1701-1702 par Jacques Cassini (Cassini II), le fils de Jean-Dominique, et Giacomo Maraldi. Ils utilisent des quarts de cercle et surtout des octants, plus petits donc plus transportables. Puis Jacques Cassini prolonge en 1718 l'arc de Picard jusqu'à Dunkerque. Il croit trouver, de façon erronée, que l'arc d'un degré est plus long vers Collioure que vers Dunkerque, et en conclut par un raisonnement partiellement faux que la Terre est allongée aux pôles, contrairement à la prédiction de Newton. Le problème n'est cependant pas tout à fait simple : la latitude est définie à partir de la verticale du lieu, qui ne passe pas en général par le centre de la Terre (figure 6.3).

C'est le mathématicien français Alexis-Claude Clairaut qui fera en 1743 la première étude théorique correcte du problème de la forme de la Terre³. Cependant, il paraît souhaitable de mesurer la longueur de deux arcs de méridien, le plus près possible de l'équateur et le plus au nord possible. C'est le but de la célèbre expédition de Pierre Bouguer, Louis Godin et Charles-Marie de La Condamine au Pérou de 1735 à 1744, et en 1736-1737 de celle de Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, Clairaut, Charles Camus, Pierre Charles Le Monnier et Renaud Outhier en Laponie (nord de la Suède)⁴. Le problème est alors résolu : le degré du méridien est plus long à haute latitude (57 438 toises par degré à 66° de latitude contre 56 753 à 1° 30'), et la Terre est bien aplatie^b. Cependant les partisans de l'allongement de la Terre ne seront

^b Maupertuis avait des doutes sur ses mesures. C'est d'ailleurs ce que montra une nouvelle triangulation dans la même région effectuée de 1801 à 1803 par des savants suédois, qui obtinrent seulement 57 197 toises au degré (voir Lalande, *CdT* pour 1806, p. 342-420, et Delambre, *CdT* pour 1809, p. 466-479).

convaincus qu'à la suite d'une nouvelle mesure de la méridienne de France de Dunkerque à Perpignan, menée en 1739-1740 par César-François Cassini de Thury (Cassini III) (figure 6.4), fils et futur successeur de Jacques Cassini, et par Nicolas Louis de La Caille. Cette mesure, prolongée vers les Flandres de 1746 à 1748, confirme que les arcs d'un degré sont plus longs vers le Nord.

L'aplatissement mesuré initialement entre le Pérou et la Laponie est d'environ $1/200$, proche de la valeur de $1/230$ qu'avait prédite Newton en supposant que la Terre était (ou plutôt avait été) un fluide homogène en équilibre entre la force de gravitation et la force centrifuge. Les nouvelles mesures suédoises de 1801-1803 mentionnées dans la note b de la page précédente donneront cependant une valeur très différente : $1/329$. Mais la Terre peut-elle être considérée comme homogène ? Clairaut résout en 1743 le problème d'une Terre en équilibre mais formée de couches de densité variable parallèles à la surface. Jean Le Rond d'Alambert en donnera une solution plus générale et étudiera la précession et la nutation, qui dépendent de la figure de la Terre.



Figure 6.4. Cassini III (1714-1784).

Les débuts de la gravimétrie

Clairaut a montré qu'il est possible de déterminer l'aplatissement de la Terre à partir de l'intensité de la pesanteur à différentes latitudes. On obtient cette intensité soit en mesurant la période d'oscillation d'un pendule de longueur fixe, soit en déterminant la longueur d'un pendule battant la seconde : c'est ainsi que Jean Richer, lors de son expédition en Guyane en 1672, avait trouvé qu'un tel pendule était plus court à Cayenne qu'à Paris. Aussi accompagnera-t-on régulièrement les triangulations de mesures de la pesanteur, faites avec des pendules initialement conçus en Angleterre qui devaient être remplacés par ceux de Borda (figure 6.5 ; encadré 6.2). Par exemple, Biot fera des mesures avec des pendules de Borda, ou des pendules très semblables, lors de son expédition aux Baléares avec Arago, puis à Clermont-Ferrand, Bordeaux, Figeac et Dunkerque en 1808-1809 avec Mathieu, en Écosse et aux îles Shetland en 1817, enfin à Londres la même année avec Arago et Humboldt⁵. Les résultats moyens réunis par Arago sont portés dans l'encadré 6.2.

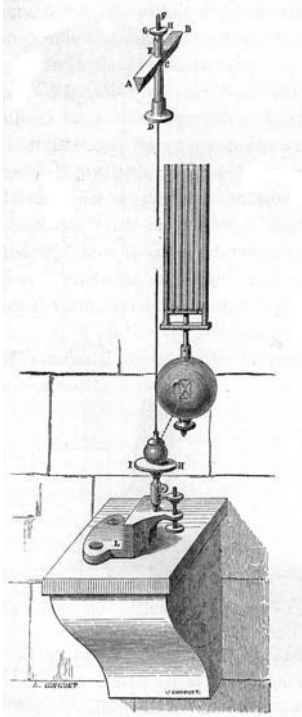


Figure 6.5. Un pendule de Borda. Ce pendule, dont la partie supérieure et inférieure sont représentées, repose par ses couteaux A,B sur une surface plane. La boule, en bas, est en platine.

Supportée par un plateau mobile, elle est libérée pour l'opération. On compare les oscillations du pendule avec celles, presque synchrones, du balancier de l'horloge située à l'arrière, dont on sait grâce à des observations astronomiques quelle est sa marche en 24 heures. On peut alors calculer la période du pendule, puis la longueur d'un pendule simple battant la seconde, qui est voisine d'un mètre. L'intensité de la pesanteur peut être déduite de l'une ou de l'autre.

Encadré 6.2. Longueur d'un pendule simple battant la seconde au niveau de la mer et intensité de la pesanteur à différentes latitudes⁶

Lieu	Longueur du pendule	Intensité de la pesanteur
Pôle	996,189 mm	9,8314 m/s/s
Paris	993,900	9,8088
Lat. 45°	993,500	9,8049
Équateur	991,022	9,7803

Les deux types de géodésie — la géodésie directe par triangulation et la géodésie dynamique à partir des mesures de gravité — donnent initialement des valeurs de l'aplatissement qui ne coïncident pas. Mais finalement Laplace trouvera en 1825 à partir de toutes les mesures disponibles à l'époque deux valeurs très proches : 1/308 à partir de la triangulation et 1/310 à partir du pendule⁷. Les effets de l'aplatissement terrestre sur le mouvement de la Lune conduiront à une valeur très semblable : 1/305, qui sera généralement retenue. On considèrera donc désormais que la Terre est bien en équilibre, ou l'a été lorsqu'elle était fluide. Cependant ces valeurs de l'aplatissement sont plus petites que celle prédite par Newton, ce qui implique que la Terre n'est pas homogène, mais de plus en plus dense vers le centre, comme l'avaient déjà compris Clairaut et d'Alembert.

Cartographie et triangulation des parallèles ; la carte de Cassini

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, les opérations de géodésie et de gravimétrie sont menées par des astronomes. Quant à la cartographie, elle est plutôt le fait d'ingénieurs géographes. On a évidemment besoin pour les réaliser de mesures de latitude et de longitude. La détermination de la latitude ne présente pas de difficultés : la latitude, qui est la hauteur angulaire du pôle céleste Nord au dessus de l'horizon, a été obtenue dès l'Antiquité par l'observation de la hauteur de l'Étoile polaire, qui est proche de ce pôle. Il n'en est pas de même de la longitude, dont la

détermination nécessite la synchronisation d'horloges aux lieux dont on veut connaître la différence des longitudes (encadré 6.3). Grâce aux premières horloges précises conçues par Christiaan Huygens, synchronisées à l'aide d'observations de phénomènes astronomiques, La Hire et Picard ont ainsi obtenu une détermination bien meilleure qu'auparavant des dimensions de la France — dimensions considérablement rétrécies par rapport aux estimations précédentes — et construisent en 1693 la première bonne carte de France en utilisant la méridienne de Picard.

Encadré 6.3. La détermination des longitudes

La longitude est l'angle entre un plan méridien passant par le point considéré de la Terre et un plan méridien de référence, choisi par convention internationale comme étant le méridien de Greenwich (à l'époque d'Arago, le méridien de référence pour les Français était celui de Paris, et pour les anglais celui de Greenwich). Les longitudes sont exprimées soit en degrés, de 0° pour le méridien de Greenwich à 180° , soit à l'Est (longitudes Est), soit à l'Ouest (longitudes Ouest), soit en heures dont chacune correspond à 15° . La différence de temps sidéral entre les passages d'une même étoile au méridien de deux lieux est égale (au signe près) à la différence de leurs longitudes. On peut donc l'obtenir en observant ce passage, ce qui nécessite que l'échelle de temps soit la même aux deux endroits. Il faut donc soit transporter une horloge fiable d'un point à l'autre, soit observer un même signal (par exemple un phénomène astronomique) de chacun des deux points pour y synchroniser des horloges, dont il faut espérer qu'elles soient stables. Les premières bonnes horloges, conçues par Christiaan Huygens, permettent de garder le temps de façon assez précise (mieux qu'une seconde par jour), mais ne sont pas transportables en fonctionnement. Heureusement, on a remarqué que les éclipses de Lune (passage dans l'ombre de la Terre) se produisent au même instant pour tous les lieux de la Terre, ce qui permet de synchroniser les horloges en ces différents lieux. Cette remarque est utilisée notamment lors de l'éclipse de Lune du

28 août 1635, qui est observée en différents points de la côte méditerranéenne. La mesure des longitudes de ces points entraîne une réduction d'un tiers des dimensions est-ouest de la Méditerranée. Par ailleurs, Galilée et d'autres ont compris très vite, dès la découverte des quatre gros satellites de Jupiter, que les fréquentes éclipses de ces satellites dans le cône d'ombre de la planète présentent les mêmes caractéristiques que les éclipses de Lune et peuvent servir à synchroniser des horloges, ou à corriger la marche d'une horloge en mer à partir des éphémérides qui prédisent l'instant des éclipses. Des observations des éclipses des satellites de Jupiter sont alors intensivement effectuées de plusieurs côtés, notamment par Jean-Dominique Cassini et ses collègues à l'Observatoire de Paris, en vue d'une solution du « problème des longitudes ». Cette technique est employée en 1671-1672 pour déterminer la différence de longitude entre l'Observatoire de Paris et celui de Tycho Brahe à Uraniborg, au Danemark, puis en 1682 pour réaliser une nouvelle carte de France. Elle est d'une bonne efficacité à terre, de sorte qu'elle sera employée pendant près d'un siècle par tous les voyageurs disposant de bonnes horloges. Mais elle est inutilisable en mer en raison des mouvements du navire qui rendent difficile l'observation des satellites de Jupiter et perturbent les horloges à pendule. La solution viendra de la construction de montres marines précises par le britannique John Harrison, en plusieurs étapes entre 1737 et 1773. De bons chronomètres de marine seront aussi construits en France par des horlogers comme Berthoud, Duroy, Lepaute, etc., et testés à terre et en mer par des astronomes : on atteindra ainsi vers 1800 une précision d'une fraction de degré après un ou deux mois de navigation. Un perfectionnement des mesures à terre sera la synchronisation des horloges par des signaux à feu visibles d'endroits éloignés les uns des autres ; on utilisera aussi en Italie les étoiles filantes, que l'on peut voir de lieux très distants⁸. Puis ce sera à partir de 1852 l'utilisation de signaux du télégraphe électrique, bien plus aisée. Les signaux horaires transmis par télégraphe puis par radio, et plus récemment l'utilisation du GPS, résoudront enfin complètement le problème des longitudes.

Il y a cependant une autre possibilité pour obtenir des distances dans le sens Est-Ouest : les mesurer directement par triangulation le long de parallèles^c. La première mesure de ce type est accomplie par Jacques Cassini de Paris à Saint-Malo en 1733, avec une prolongation ultérieure jusqu'à Brest, puis de Paris à Strasbourg en 1734. Elle n'a cependant pas un but cartographique, mais est destinée à connaître la longueur d'un arc Est-Ouest correspondant à une certaine différence de longitude : à une latitude donnée, cette quantité dépend en effet de la forme de la Terre. Le résultat sera peu concluant de ce point de vue, en raison de l'incertitude sur les longitudes. Mais on réalise l'intérêt de telles mesures pour la cartographie. Lorsque Louis XV ordonne en 1747 la construction d'une nouvelle carte de France, on a déjà refait la mesure de la méridienne de Paris dont nous avons parlé plus haut. Cette mesure, et celle du parallèle de Brest à Strasbourg, donnent l'ossature de la célèbre *Carte de Cassini* (son échelle est de 100 toises par ligne, soit 1/86 400). Celle-ci, dont l'établissement occupe une vingtaine d'ingénieurs géographes sans compter les astronomes, n'est pas encore tout à fait terminée à la Révolution, alors que le fils de Cassini de Thury, Jean Dominique Cassini (Cassini IV, figure 6.6), le dernier astronome de la dynastie, a repris le flambeau depuis 1784. La carte de Cassini — il vaudrait mieux dire *des* Cassini — représente un progrès considérable par rapport aux cartes précédentes. Mais elle ne comporte pas d'indications d'altitude : on ne se préoccupe pas encore de mesurer les altitudes, et on n'essaie même pas de corriger la triangulation des différences d'altitude lorsqu'elles sont faibles, ce qui allège considérablement les calculs, très pénibles à l'époque.



Figure 6.6. Jean-Dominique Cassini (Cassini IV, 1748-1845).

Les triangulations de la fin du XVIII^e siècle

En 1761-1762, la triangulation du parallèle de Paris est prolongée jusqu'à Vienne en Autriche. De 1770 à 1790, on réalise la triangulation de la Corse. En 1787, on fait le troisième rattachement géodésique de l'Observatoire

^c Jacques Cassini avait même imaginé en 1739 mesurer la distance de la montagne Sainte-Victoire et le mont Saint-Clair à Sète en utilisant la vitesse du son produit par un canon dont on voyait l'éclair : cette vitesse était déjà assez bien connue.

de Paris et de celui de Greenwich⁹ (les deux premiers avait eu lieu en 1681 et en 1697, la différence de longitude ayant alors été déterminée par voie astronomique, en utilisant les éclipses du premier satellite de Jupiter, Io¹⁰). C'est l'occasion d'essayer de nouveaux instruments. En Angleterre, les opérations, placées sous la direction du général William Roy, utilisent un des premiers théodolites, construit par Jesse Ramsden (figure 6.7)^d. Les bases sont mesurées d'abord avec des tubes de verre (considérés alors comme de bonnes règles), puis avec des chaînes d'acier posées sur des règles de bois et tendues par des poids, ce qui paraît une meilleure technique. En France, les opérations, réalisées par Jean-Dominique Cassini (Cassini IV) , Pierre André Méchain et Adrien Marie Legendre, accompagnés par l'astronome de Palerme Giuseppe Piazzi, utilisent pour la première fois le cercle répétiteur de Borda, construit vers 1784 par Le Noir¹¹. C'est un excellent instrument, qui sera encore utilisé à l'occasion près d'un siècle plus tard (figure 6.8 ; encadré 6.4). La triangulation est raccordée du côté français à la méridienne de Cassini de Thury et de La Caille, ce qui complète le rattachement jusqu'à Paris : on a ainsi obtenu pour la première fois une bonne valeur de la différence de longitude entre les deux observatoires, ce qui présente un grand intérêt pour comparer les observations astronomiques que l'on y fait. Il est remarquable que cette opération se soit déroulée de façon satisfaisante à une époque où les relations entre la France et l'Angleterre étaient loin d'être bonnes. Cassini IV exprime ainsi sa satisfaction en 1788, à la fin de l'opération¹² :

« Par ce moyen, les cartes de France et d'Angleterre ne forment plus qu'un même tout, entrent dans un même système et donnent lieu d'espérer que cette entreprise, dont la France a donné l'exemple, embrassera bientôt l'Europe toute entière. »

^d Bien développé en Angleterre, le théodolite n'apparaît en France que vers 1800 sous la forme d'un instrument à cercle unique horizontal, construit par Le Noir. Les théodolites à deux cercles, permettant à la fois des mesures d'azimut et de hauteur, sont apparus plus tard, surtout construits par Gambey. Ils ont alors très progressivement remplacé les cercles de Borda, qui s'usaient assez vite en raison du grand nombre de rotations qu'ils subissaient.

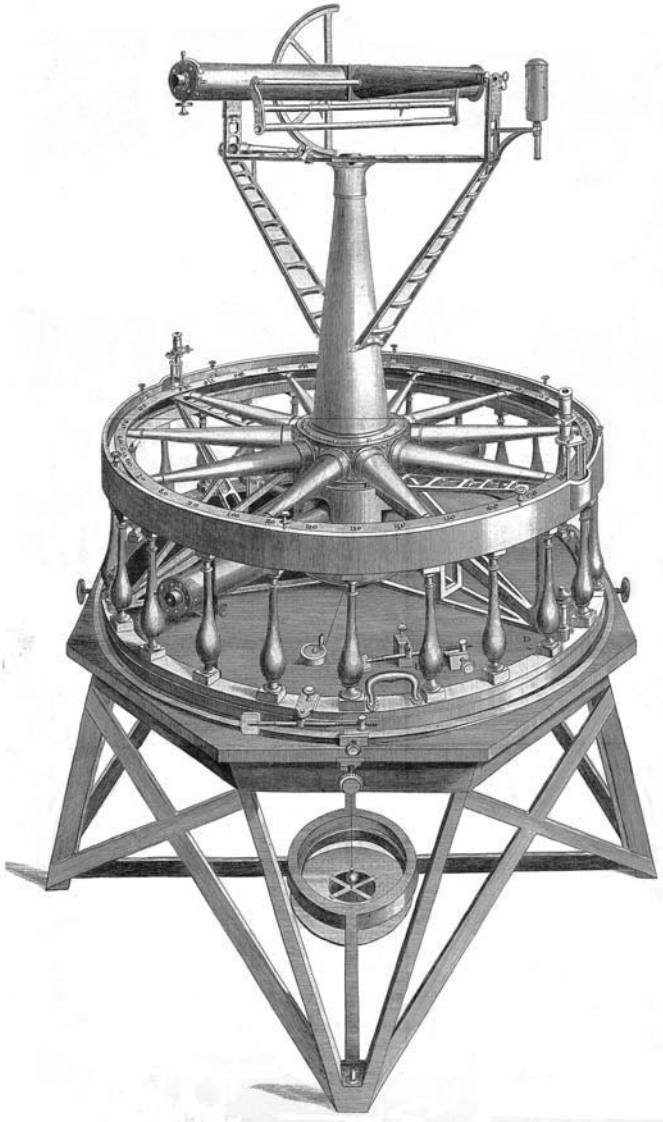


Figure 6.7. Le grand théodolite de Ramsden (vers 1780). C'est un des tout premiers théodolites, qui permet de mesurer des angles dans un plan horizontal pour la triangulation, mais pas les hauteurs. Le cercle divisé, au-dessus de la balustrade en acajou, est réputé pour sa précision.

Encadré 6.4. Le cercle répétiteur de Borda

Le cercle de Borda est un instrument de mesure d'angles, qui se compose de deux lunettes dont l'orientation est repérée sur un cercle divisé unique, dont elles peuvent être solidarisées ou désolidarisées. Cet ensemble peut prendre n'importe quelle



Figure 6.8. Un cercle répétiteur de Borda, construit par Le Noir.

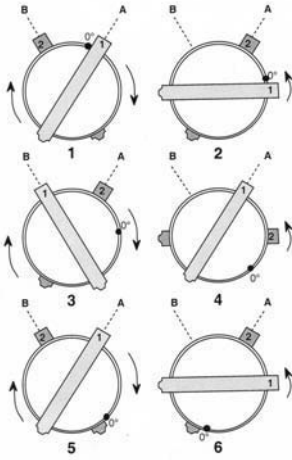


Figure 6.9. Fonctionnement du cercle répéteur de Borda pour la mesure de l'angle entre deux directions. Explications dans l'encadré.

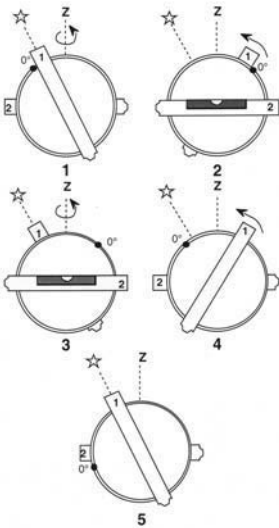


Figure 6.10. Fonctionnement du cercle répéteur de Borda pour la mesure de la distance angulaire d'une étoile au zénith. Explications dans l'encadré.

orientation : en position proche de l'horizontale, on peut mesurer l'angle entre deux repères terrestres pour la triangulation, et en position verticale on peut mesurer grâce à un niveau la hauteur d'une étoile à son passage au méridien, ce qui permet de déterminer la latitude du lieu. La figure 6.9 en explique le fonctionnement dans le premier cas (le principe a été énoncé par l'astronome allemand Tobias Mayer en 1724). Pour mesurer l'angle entre deux directions A et B, on pointe la lunette 1 vers A et la lunette 2 vers B (configuration 1). Le point 0° représente l'origine des graduations du cercle. On bloque le cercle sur la lunette 1 et on tourne l'ensemble jusqu'à ce que la lunette 2 vise A (2) ; on la bloque alors sur le cercle. On débloque alors la lunette 1 et on l'oriente vers B (3), puis en solidarissant à nouveau cette lunette avec le cercle on tourne le tout jusqu'à ce qu'elle vise A (4). Désolidarisant cette fois la lunette 2 du cercle, on l'oriente vers B (5) : on se retrouve dans la configuration (1), mais le cercle a tourné de deux fois l'angle AB. Puis on recommence (configuration 6). On effectue cette opération le plus grand nombre de fois possible ; à la fin on mesure l'angle dont a tourné le cercle et on le divise par le double du nombre de rotations pour obtenir l'angle recherché AB. L'intérêt est que la précision est accrue par la réduction considérable des erreurs de lecture du cercle et de pointage des lunettes, et que les erreurs dues à l'excentrement du cercle et à l'imperfection des graduations sont également réduites. On peut ainsi obtenir avec un petit cercle, donc un instrument transportable, des résultats comparables à ceux d'un cercle beaucoup plus grand comme celui du théodolite de Ramsden (figure 6.7). Mais certaines erreurs systématiques ne sont pas éliminées par ce processus.

Pour mesurer, au voisinage de son passage au méridien, la hauteur d'une étoile au-dessus de l'horizon, ou plutôt sa distance angulaire au zénith qui en est le complément (figure 6.10), on place le cercle en position verticale. On règle à l'horizontale la lunette 2 dont est solidaire un niveau à bulle, et on pointe la lunette 1 sur l'étoile (1). Puis on fait pivoter le cercle de 180° autour de l'axe vertical (2), et on vise à nouveau l'étoile avec la lunette 1, le cercle divisé

étant désolidarisé de cette lunette (3). On fait à nouveau pivoter le cercle de 180° (4), et on vise à nouveau l'étoile avec la lunette 1 après en avoir rendu solidaire le cercle divisé (5). Celui-ci a donc tourné de deux fois la distance zénithale de l'étoile depuis la position (1). Puis on recommence les étapes (2), (3), (4) et (5) jusqu'à avoir accumulé assez de mesures. À toutes ces étapes, un aide replace le niveau de la lunette 2 à l'horizontale en agissant sur les petites vis auxiliaires du pied du cercle répéiteur.



Figure 6.11. Pierre André Méchain (1744-1804).

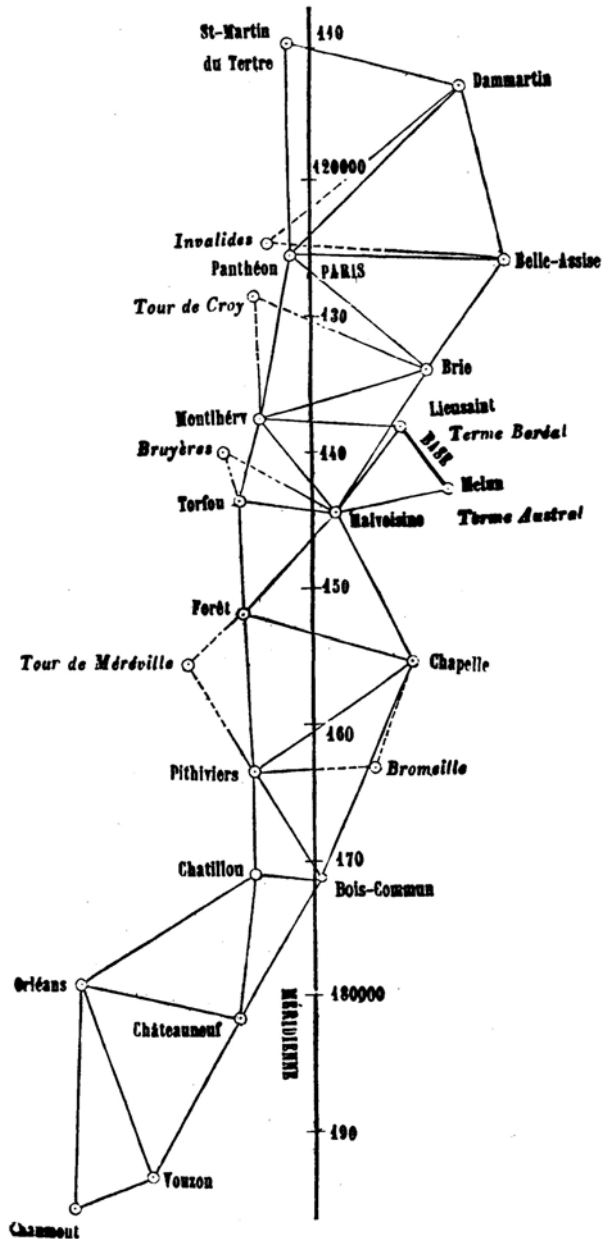
La mesure du méridien de Dunkerque à Barcelone

En 1791, l'Assemblée constituante, désireuse de fournir au monde un système décimal universel de mesures qui remplacerait l'énorme diversité des mesures utilisées en France et ailleurs, charge Delambre et Méchain (figure 6.11) de mesurer la longueur d'un arc de méridien entre Dunkerque et Barcelone (figure 6.12). L'idée est que les nouvelles unités doivent être rattachées à une grandeur immuable : la longueur du méridien du globe terrestre, dont le mètre sera la dix-millionième partie du quart^e. Les triangulations effectuées jusqu'alors, qui ne tenaient pas compte des altitudes, paraissaient d'une précision insuffisante pour ce but, et c'est pourquoi une nouvelle mesure est décidée. En attendant, on construit des mètres provisoires à partir des déterminations précédentes des dimensions de la Terre, et on les distribue dans le royaume afin que l'on s'habitue à la nouvelle unité.

L'histoire de cette triangulation (1792-1798), menée avec une grande rigueur scientifique en dépit d'énormes difficultés dues à l'époque troublée, est suffisamment bien connue pour n'être pas rappelée ici : décrite en grand détail par leurs auteurs pour les spécialistes¹³, elle a fait l'objet de plusieurs livres de vulgarisation auxquels on pourra se reporter¹⁴. Nous nous bornerons donc ici à quelques points techniques parmi les moins connus.

^e On avait également envisagé de prendre pour unité la longueur d'un pendule battant la seconde à la latitude de 45° , mais cette idée, qui remonte à Picard, tourna court en raison des difficultés de sa réalisation pratique.

Figure 6.12. Une partie de la méridienne mesurée par Delambre aux alentours de Paris. On y voit la base mesurée de Melun à Lieusaint.



Pour préparer cette expédition, Borda a fait construire par Le Noir quatre nouveaux cercles répéteurs, quatre règles de 2 toises (un peu moins de 4 m) de long

destinées à la mesure des bases^f, et des « réverbères » à miroir parabolique et lampe à huile pour observer de nuit les points géodésiques. Les règles sont des instruments particulièrement bien conçus (figure 6.13), ce qui n'empêche pas que la mesure d'une base en les plaçant bout à bout soit une opération majeure : la mesure de la base de Melun à Lieusaint, d'une longueur d'environ 11 km, demanda 36 jours. Pour contrôle, on mesurera un peu plus tard une deuxième base de 11 km près de Perpignan. On constatera qu'elle ne diffère que de 30 cm de la distance que l'on a calculée entre ses extrémités après toute la triangulation de Paris à Perpignan : un accord remarquable, mais partiellement fortuit.

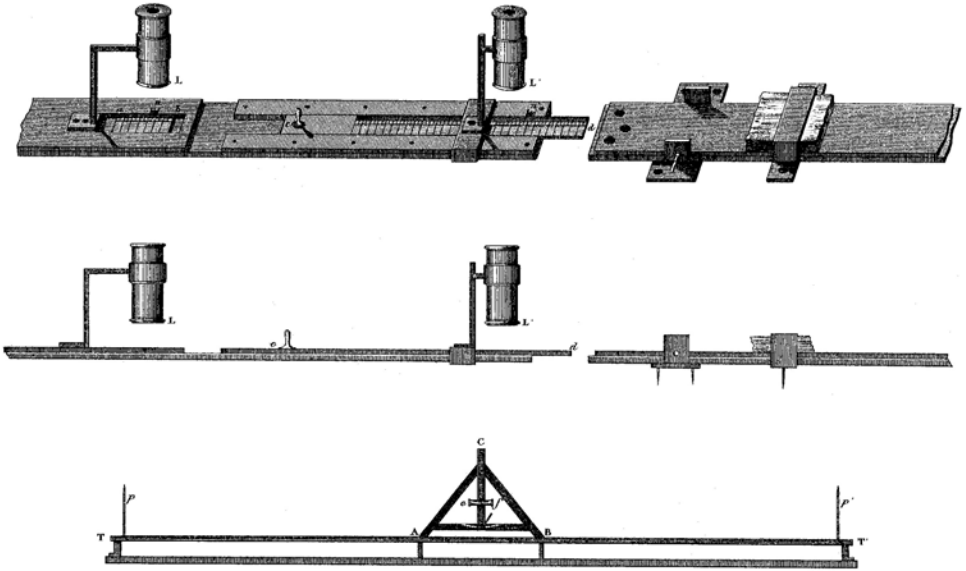


Figure 6.13. La règle de Borda. Destinée à la mesure d'une base de triangulation, cette règle est formée d'une lame de laiton superposée à une lame de platine, qui sont assujetties à une extrémité. À l'autre extrémité, le microscope de gauche L fixé à la règle de laiton vise une fenêtre où l'on voit des graduations sur la lame de platine, ce qui permet de mesurer la dilatation relative des deux règles et de ramener en conséquence les mesures à une même température. Pour éviter la dégradation des extrémités, les règles ne sont pas mises bout à bout : un régle gradué coulisse dans l'extrémité de la règle de platine de gauche et est amené en contact avec le bout de la règle de droite ; sa position est repérée avec le microscope L'. Les règles sont mises à l'horizontale grâce au niveau triangulaire visible en bas au centre, et alignées par visée des tiges repères p et p'.

^f Conservées à l'Observatoire de Paris.

Delambre et Méchain mesurent non seulement les angles des triangles formés par les différents signaux géodésiques, mais leur hauteur par rapport à l'horizontale. Le but est de rabattre par le calcul sur le plan horizontal les angles des triangles qui sont mesurés dans des plans plus ou moins inclinés, et accessoirement de déterminer les altitudes (on avait de toute façon besoin de connaître l'altitude des bases de Melun et de Perpignan). La mesure des distances zénithales (complément à 90° des hauteurs) se fait avec le cercle répétiteur en position verticale, comme pour mesurer la hauteur des étoiles (figure 6.10). Progressant l'un vers le Sud à partir de Paris (Delambre) et l'autre vers le Nord à partir de Barcelone (Méchain), les deux savants se retrouvent à Rodez, dont ils obtiennent chacun une mesure de l'altitude du clocher de la cathédrale, respectivement par rapport au niveau moyen de la mer du Nord et de la Méditerranée. Delambre mesure 706,98 m et Méchain 706,06 m : encore un accord remarquable mais peut-être en partie fortuit⁸. Pour améliorer les mesures d'altitude, il aurait fallu faire un maillage beaucoup plus serré, ce dont Delambre est parfaitement conscient.

Pour obtenir la circonférence du méridien terrestre, donc le mètre qui est la dix-millionième partie du quart, il faut connaître la différence de latitude correspondant à la longueur mesurée de Dunkerque à Barcelone, et donc déterminer les latitudes des deux extrémités avec le cercle répétiteur, placé en position verticale. On doit aussi tenir compte de l'aplatissement de la Terre, qui est alors estimé à $1/335$ à partir des mesures gravimétriques avec pendule de Borda : on n'a pas confiance dans l'aplatissement déduit des mesures au Pérou et en Laponie, ces dernières en particulier étant médiocres comme nous l'avons vu. Mais heureusement l'effet de l'aplatissement est faible à ces latitudes voisines de 45° . À la suite de ces opérations et des pénibles réductions effectuées principalement par Delambre, la Commission des poids et mesures fixe en 1799 la longueur du mètre à 443,296 lignes de la toise du Pérou, l'étalon utilisé par Godin, La Condamine et Bouguer lors de leur expédition (figure 6.14), qui avait servi à exprimer la longueur des règles de Borda¹⁵. La toise



Figure 6.14. Inscription sur la boîte de la toise du Pérou (vers 1735). La toise elle-même est une barre d'acier construite par C. Langlois.

⁸ Laplace estime que l'erreur sur l'altitude de Paris déduite des opérations de la méridienne est en réalité de l'ordre de 8 mètres.

vaut donc 1,94904 mètre. Douze mètres étalons en fer et trois en platine sont alors construits par Le Noir selon cette spécification pour remplacer les mètres provisoires fabriqués avant la triangulation. C'est le mètre en platine des Archives nationales qui fait foi ; les deux autres sont déposés à l'Observatoire et au Conservatoire des arts et métiers¹⁶. La substitution du mètre définitif au mètre provisoire ne se fera pas sans difficultés car on s'est habitué à utiliser ce dernier, au demeurant fort peu différent car il mesure 443,44 lignes.

Cependant le projet primitif avait envisagé la mesure d'un arc de méridien plus long, de façon qu'il y ait symétrie de part et d'autre du parallèle de 45° pour minimiser l'effet de l'aplatissement du globe terrestre. Alors que tout semble terminé, le Bureau des longitudes se préoccupe du problème, et Méchain insiste pour être chargé de la prolongation de la méridienne jusqu'aux îles Baléares. Il pense du même coup corriger une erreur qui le ronge : en effet, ayant mesuré la latitude de deux stations de Barcelone, il avait trouvé que la différence de ces latitudes était plus grande que ce que laissait prévoir la mesure directe de la distance par triangulation. Méchain repart donc pour Barcelone en 1803, mais est bientôt victime de la malaria et meurt le 20 septembre 1804 à Castellón de la Plana, sans avoir été bien loin dans ses nouvelles mesures ni résolu son problème. Les études ultérieures, résumées dans l'encadré 6.5, ont montré qu'il n'avait pas réellement commis d'erreur et s'était miné le moral et la santé pour rien.

Encadré 6.5. L'« erreur » de Méchain

Le problème de Méchain a été examiné plusieurs fois par la suite, notamment en 1812-1813 par Arago qui fait remarquer que la mise au point de la lunette peut entraîner une différence de plusieurs secondes de degré entre observateurs de vue différente¹⁷, et aussi en 1828 par un astronome de l'Observatoire de Paris, Jean-Nicolas Nicollet, qui travaille sur des idées d'Arago^h. Nicollet écrit¹⁸ :

^h Nicollet, pour lequel Arago n'avait guère de considération, fut ruiné par des spéculations douteuses et émigra aux États-Unis en 1830.

La comparaison des latitudes de Mont-Jouy et de Barcelone, telle qu'elle est faite dans le deuxième volume de la mesure de la Méridienne [c'est-à-dire le volume 2 de la Base du système métrique, cf. note 13], présente une différence de $3''\frac{1}{4}$ plus grande qu'elle ne devrait être d'après la distance exactement connue des deux observatoires. On a essayé de l'expliquer par un défaut de verticalité dans le plan de l'instrument, et ensuite par l'attraction que le Mont-Jouy aurait exercée sur le fil-à-plomb pendant les observations de Barcelone. Mais les suppositions qu'il falloit exagérer, d'une part, et l'examen des localités de l'autre, n'ont pas permis de s'arrêter à ces idées.

On a aussi incriminé les observations par Méchain d'une étoile qui s'est révélée double, ζ *Ursae majoris* : mais ce n'est pas l'essentiel. Méchain avait fait des observations dans des conditions différentes à Montjouy et à Barcelone. Or le cercle répétiteur utilisé a une erreur systématique, ce que Méchain n'avait pas pu voir mais que d'autres, dont Arago, ont découvert : les latitudes mesurées à partir d'étoiles passant au nord et au sud du zénith diffèrent de plusieurs secondes de degré. Nicollet conclut :

« Aussi à peine [ce fait] a-t-il été connu, que cette différence a cessé d'être une difficulté aux yeux de quelques savans qui eurent l'occasion d'en faire le rapprochement. Dans la séance du Bureau des Longitudes, en date du 11 novembre 1818, Mr. Arago, en rendant compte de la manière dont il venoit de déterminer, avec Mr. Biot, la latitude de Dunkerque, fit remarquer que la latitude de Barcelone, déduite de même des étoiles boréales [culminant au nord du zénith] et australes [culminant au sud], s'accorde avec la mesure géodésique. »

Refaisant alors les calculs en corrigeant l'erreur systématique du cercle, avec de meilleures valeurs de la déclinaison des étoiles et des tables de réfraction plus correctes, Nicollet trouve à partir des mesures de Méchain, incluant celles de ζ *Ursae majoris*, que l'anomalie se réduit à 0,21 seconde de degré, ce qui est à la limite des erreurs. L'extrémité sud de l'arc de méridien a une latitude de 0,42 seconde de degré plus faible que celle qui a été adoptée par la Commission des poids et mesures pour définir le mètre, ce qui est très peu. Les mesures de Méchain étaient donc bonnes, mais incomplètes.

Arago indique¹⁹ que le défaut du cercle répétiteur avait été attribué à la petitesse du cercle gradué, ce qui a conduit Laplace à commander à Reichenbach, de Munich, un instrument dont on parlera au chapitre 8, qui comportait un cercle de 1 mètre de diamètre que les Français n'avaient pas les moyens de construire à l'époque ; mais, au dire d'Arago, « *ce cercle lui-même n'était pas affranchi de ces erreurs.* »

Les travaux d'Arago

L'extension de la méridienne jusqu'aux Baléares : faut-il changer la longueur du mètre ?

Le 2 mai 1806, le Bureau des longitudes décide de recommencer les mesures au sud de Barcelone, et de les étendre jusqu'aux Îles Baléares. Il charge de l'opération Biot, aidé du tout jeune savant qu'est alors Arago, qui parle le catalan. Leurs instruments comportent deux cercles répétiteurs et une lunette méridienne portable. Les travaux, résumés par Arago lui-même dans un de ses *Mémoires scientifiques*²⁰, commencent en octobre 1806, avec l'aide de deux espagnols : Chaix et Rodriguez. Après un début rapide utilisant les mesures faites par Méchain avant sa mort, ils sont coincés près de six mois au Desierto de las Palmas par une visibilité médiocre et de mauvais réglages de certains signaux géodésiques. Ils finissent cependant par atteindre Ibiza. Après l'avoir rattachée au continent, une opération très difficile en raison des distances considérables qui sont en jeu (jusqu'à 170 kilomètres)ⁱ, ils continuent vers Formentera en avril 1807. Biot rentre à Paris en mai 1807, emportant un des deux cercles répétiteurs qui était endommagé. Il laisse Arago continuer seul les observations avec l'autre cercle, dû à Le Noir (voir la figure 6.8). Biot revient en Espagne fin novembre, apportant un nouveau cercle construit cette fois par Fortin (figure 6.15 et figure 4.4), mais retourne à Paris dès le 18 janvier 1808 avec les résultats. Arago se retrouve donc seul avec ses deux collègues espagnols, et réussit à rattacher Majorque aux

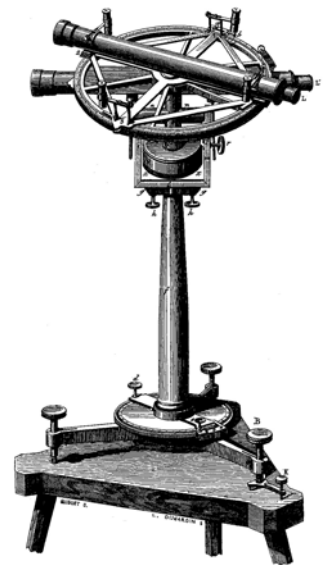


Figure 6.15. Gravure d'un cercle répétiteur de Borda construit par Fortin. Les différences avec le cercle de Le Noir (figure 6.8) sont assez mineures. Voir aussi la figure 4.4.

ⁱ Les mesures doivent se faire de nuit, avec des signaux lumineux provenant de lampes à huile munies de réflecteurs, que l'on entretient allumées toute la nuit.

deux autres îles. À dire vrai, cette extension vers l'Est n'est pas essentielle pour la mesure de la méridienne, mais on cherche à mesurer la longueur correspondant à une assez grande différence de longitude, en l'occurrence 3 degrés, toujours en vue de déterminer l'aplatissement de la Terre.

Arago a juste le temps de terminer ses mesures lorsque la guerre est déclarée entre la France et l'Espagne, en mai 1808. Alors commencent les aventures qu'Arago raconte dans *l'Histoire de ma jeunesse* et qui contribueront à sa célébrité. Ses tribulations ne se terminent que le 2 juillet 1809 à Marseille, plus d'un an après. Malgré ces difficultés, il ramène résultats et instruments.

On ne peut qu'admirer Biot et surtout le jeune Arago pour avoir réussi à mener à bien leur mission dans des conditions particulièrement difficiles, dont on trouvera le détail dans l'ouvrage de Maurice Daumas²¹. Ils réalisent la triangulation prévue avec la meilleure précision possible¹ : Laplace estime à seulement 8 mètres l'erreur probable sur la distance Perpignan-Formentera, qui est d'environ 460 km à vol d'oiseau²². Outre les observations de passages au méridien d'étoiles et du Soleil et les observations de latitude nécessaires à leur programme, ils ont fait de nombreuses observations météorologiques et aussi des mesures de la pesanteur avec un pendule de Borda. L'extension de la méridienne aux Baléares ne fait que confirmer la valeur admise précédemment pour le mètre, ce qui a au moins le mérite de montrer la qualité de l'ensemble des mesures. En effet, en utilisant un aplatissement de 1/305 pour la Terre déduit par Laplace de la théorie de la Lune, le Bureau des longitudes obtient en 1809, après toutes les mesures, une longueur du mètre égale à 443,2958 lignes de la toise du Pérou, identique à celle de 1799 : il n'y a donc pas lieu de construire d'autres mètres étalons. Le Bureau écrit²³ :

« On voit que la mesure de la méridienne, qui vient d'être faite en Espagne, confirme la valeur du mètre, et lui donne une nouvelle certitude, en la rendant presque indépendante de l'aplatissement de la Terre.[...] Pour l'étendue, la situation, et l'exactitude des moyens employés, [cette mesure] forme la plus belle opération de ce genre que l'on ait jamais exécutée. »

¹ Arago et Biot étaient devenus des virtuoses du maniement du cercle répétiteur : ils parvenaient à accumuler plus de cent mesures de la distance zénithale d'une étoile en une heure, alors que Cassini IV n'en faisait qu'une dizaine en douze minutes.

La mesure de Delambre, Méchain, Biot et Arago n'est pas la seule : de 1802 à 1809, l'anglais William Lambton mesure un arc de méridien de presque 11 degrés en Inde, et trouve pour le mètre une valeur plus courte de 1/25 de ligne²⁴ ! On commence à se rendre compte que la Terre n'est pas un ellipsoïde de révolution, et qu'en conséquence la définition du mètre pourrait dépendre du méridien utilisé. D'autre part, Louis Puissant découvre en 1836 une erreur assez subtile qu'avait faite Delambre en calculant la distance entre les parallèles de Barcelone et de Formentera²⁵ : ce calcul supposait implicitement que les méridiens des deux lieux sont parallèles entre eux, ce qui n'est évidemment pas le cas. En corrigeant ce calcul et en combinant les mesures de Formentera à Dunkerque avec de nouvelles mesures entre Dunkerque à Greenwich, Puissant trouve que la distance entre les parallèles de Greenwich et de Formentera est trop courte de 90 toises, le mètre prenant alors une valeur de 443,375 lignes²⁶ : une nouvelle commission nommée par l'Académie des sciences ne peut que confirmer ce fait²⁷. Elle recommande finalement de ne pas changer la longueur du mètre, en prenant en compte la véritable forme de la Terre :

« Si jamais on avait eu l'étrange pensée de faire varier l'unité de longueur au fur et à mesure des progrès de la géodésie, on aurait été contraint de l'abandonner en voyant tant de mesures des méridiens et des parallèles manifester des irrégularités locales très-considérables et prouver que le globe en masse n'est pas un solide de révolution. »

On en reste donc à l'unité de 1799. C'en est fait de la belle idée de l'Assemblée constituante selon laquelle le mètre devait être pour toujours lié aux dimensions de la Terre. On peut donc considérer, si l'on veut, que les époques de Delambre, de Méchain, de Biot et d'Arago n'ont servi à rien. Mais elles n'en restent pas moins gravées dans la mémoire collective.

Arago conservera jusqu'à la fin de sa vie son intérêt pour le mètre, comme en témoignent les procès-verbaux des séances du Bureau des longitudes, dont il fut secrétaire de 1823 à 1853 avec une interruption de deux ans. Il fait lui-même de nombreuses comparaisons entre différents mètres et toises, et rapporte en particulier sur les différences de longueur entre les mètres de 1799, sur le coefficient de dilatation du platine dont trois d'entre eux sont faits, etc. Ce sont d'ailleurs les difficultés que

l'on a à mesurer de façon fiable la longueur du mètre étalon de 1799 qui ont conduit à en construire d'autres mieux conçus, dont le fameux prototype international du Pavillon des poids et mesures de Sèvres (Hauts-de-Seine), choisi en 1889 pour une nouvelle définition du mètre²⁸. En 1960, cette définition sera elle-même abrogée et remplacée par la suivante :

« Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86. »

On s'est bien entendu arrangé, une fois de plus, pour que la nouvelle définition soit cohérente avec la précédente, c'est-à-dire pour que la longueur ainsi déterminée coïncide le mieux possible avec celle du mètre de Sèvres. Malheureusement, on s'aperçoit que la raie spectrale du krypton que l'on avait utilisée est asymétrique et que la définition est encore imparfaite. Cependant, plusieurs laboratoires, dont le Laboratoire primaire du temps et des fréquences de l'Observatoire de Paris, sont parvenus vers 1970 à mesurer simultanément la longueur d'onde dans le vide et la fréquence de la radiation d'un laser, dont le produit est égal à la vitesse de la lumière. La mesure de la longueur d'onde est rapportée à la définition alors en vigueur du mètre, et celle de la fréquence à la seconde. La vitesse de la lumière est ainsi déterminée avec une précision extrêmement grande²⁹. Ceci conduit à abroger à son tour la définition de 1960 ; aujourd'hui, le mètre dérive de la vitesse de la lumière dans le vide, constante fondamentale pour laquelle on recommande en 1975 d'adopter la valeur conventionnelle de 299 792 458 mètres par seconde. La nouvelle définition de 1983 en découle :

« Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde. »

Tout ceci peut paraître au profane d'un intérêt limité. Il faut cependant réaliser que les mesures précises de distance sur la Terre, qu'elles soient faites par des topographes sur de grandes distances ou par des géomètres dans les propriétés privées ou publiques, n'utilisent plus des règles ou des chaînes d'arpenteur, mais des GPS ou des télémètres laser qui mesurent le temps de propagation d'ondes électromagnétiques : lumière visible ou infrarouge, ou ondes radio. Si le GPS nous permet de savoir où nous sommes et nous guide pour nous rendre d'un

endroit à un autre, c'est aussi en utilisant la vitesse de la lumière. La nouvelle définition du mètre est donc passée dans la vie courante et répond à une logique pratique dont on n'avait certainement pas encore saisi toute l'importance en 1983.

Le nouveau raccordement géodésique de la France et de l'Angleterre

Malgré les nouveaux instruments que l'on a mis en service à cette occasion, le raccordement de 1787 entre les observatoires de Paris et de Greenwich n'a pas été un succès complet, car on est arrivé à des résultats quelque peu discordants. Ce qui paraît alors être la meilleure valeur pour la différence de longitude entre les deux lieux est 9 m 18,8 s. Les relations entre la France et l'Angleterre s'étant considérablement améliorées après 1815, les deux pays se mettent d'accord pour refaire l'opération, bénéficiant cette fois de la triangulation de Delambre jusqu'à Dunkerque, tandis que Laplace avait fait, comme nous l'avons vu, les premières estimations quantitatives des erreurs sur les opérations géodésiques³⁰. Déjà Arago et Humboldt sont allés à Londres avec Biot en 1817 pour comparer la longueur de leurs pendules battant la seconde avec celle des pendules du capitaine Henry Kater, dont ils ont ainsi fait la connaissance. Biot et Arago ont par ailleurs collaboré en 1818 avec le général anglais Mudge pour mesurer la latitude de Dunkerque, limite commune des arcs français et anglais³¹.

En 1821, l'Académie des sciences et le Bureau des longitudes choisissent Arago et Mathieu pour réaliser l'opération, tandis que la Royal Society de Londres désigne Kater et le capitaine Colby. Les mesures commencent le 24 septembre 1821 pour s'interrompre provisoirement le 27 octobre, la météo devenant peu propice. Alors « *our much-esteemed companion M. Arago* » s'en retourne à Paris. La triangulation reprend le 12 août 1822 avec Arago et Mathieu, s'interrompt à nouveau en novembre, puis reprend encore en juillet 1823 mais cette fois sans Arago. La figure 6.16 montre les triangles mesurés. Les instruments utilisés sont sensiblement les mêmes que ceux de 1787 : côté anglais, le théodolite de Ramsden, remplacé en 1823 par un théodolite semblable appartenant à l'Ordnance Survey, et côté français un cercle répétiteur et

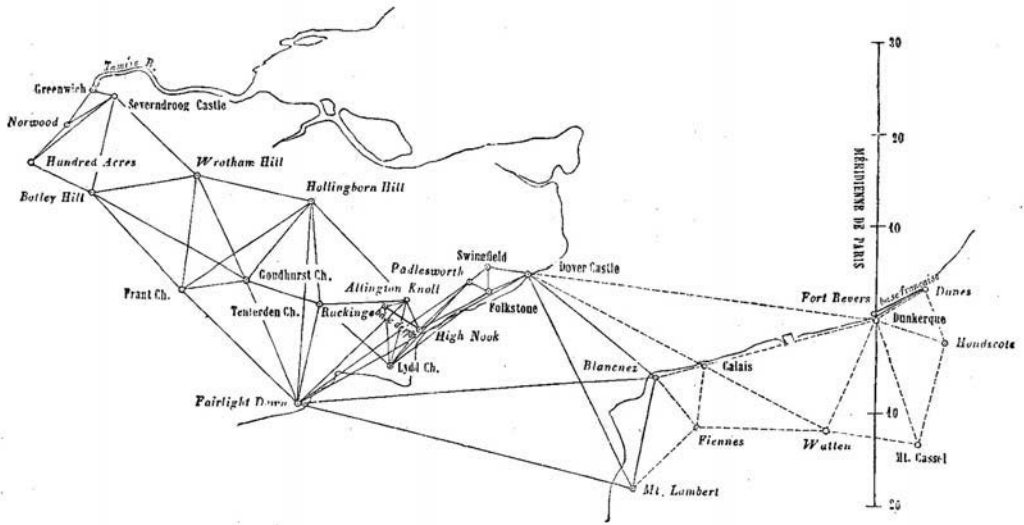


Figure 6.16. Le rattachement par triangulation de la France et de l'Angleterre.

un théodolite de Gambey³² (figure 6.17). Mais il y a une amélioration d'importance : les « réverbères » que l'on vise la nuit sont des « *lamps with compound lenses* » de Fresnel, autrement dit des lentilles de phare à échelons polygonaux, de 3 pieds de diamètre, que l'on voit « à 48 miles comme une étoile de première grandeur ».

Les résultats de la campagne de triangulation ne seront jamais remis aux Anglais par Arago (ils n'ont peut-être jamais été réduits), comme l'indique Kater³³ cinq ans après la fin des opérations^k :

« Il est regrettable que notre excellent associé M. Arago n'ait pas encore publié le résultat de ses opérations en France ; et je dois donc [utiliser] la longitude de Calais telle qu'elle est donnée dans la *Connaissance des Temps*, soit $0^{\circ} 28' 59''$ à l'ouest de Paris. Ajoutant ceci à $1^{\circ} 51' 18'',73$, la longitude Est de Calais par rapport à Greenwich, obtenue par le présent travail, nous obtenons $2^{\circ} 20' 17'',73$ pour la différence de longitude entre Paris et Greenwich. Converti en heure ceci correspond à 9 m 21 s,18, ce qui diffère seulement



Figure 6.17. Un théodolite répéteur à deux cercles et à deux lunettes construit par Gambey vers 1821. Il aurait servi au rattachement de la France à l'Angleterre en 1821-1823. Des théodolites semblables ont été utilisés pour la triangulation de la France.

^k Bigourdan (1932) p. A65-A66, et d'après lui Levallois (1988), p. 131, écrivent que les résultats de l'opération, remis au Capitaine Ketter (en réalité Kater) ont été perdus après le décès de ce dernier « peu après » la fin des opérations. On voit qu'il n'en est rien.

de 0 s,28 par défaut des résultats admirables obtenus par les opérations avec des signaux à feu, rapportés dans les Philosophical Transactions pour 1826, par Mr. Herschel. »

John Herschel et le capitaine Sabine, côté anglais, et le colonel Bonne et le lieutenant Largeteau, côté français, avaient en effet mesuré la différence de longitude entre les deux observatoires en synchronisant en chaîne les horloges de diverses stations par la méthode des feux instantanés de poudre, signaux que l'on pouvait apercevoir de deux stations consécutives. Il y avait deux stations intermédiaires entre Greenwich et Paris. Une fois les horloges des observatoires de Paris et de Greenwich synchronisées, on y observait le passage d'étoiles au méridien, et l'on pouvait en déduire la différence de longitude entre ces deux stations, soit 9 m 21,46 s³⁴. Ce résultat est visiblement considéré par Kater comme plus fiable que le sien, et c'est sans doute pourquoi il n'insiste pas davantage auprès d'Arago, qui est déjà, comme bien souvent, parti vers d'autres horizons. Néanmoins, on n'abandonne pas encore la détermination des longitudes par les méthodes astronomiques, puisque l'astronome de l'Observatoire de Paris Jean-Jacques-Émile Goujon obtient en 1847 une différence de longitude de 9 m 21,6 s, peu différente de la précédente, à partir d'observations de la position de la Lune³⁵. Un résultat meilleur est finalement obtenu en juin 1854 grâce au télégraphe électrique³⁶ : 9 m 20,63 s, ce qui diffère de près d'une seconde de temps des déterminations précédentes.

Le rattachement France-Angleterre par triangulation est encore refait en 1861, assez mal car il y a de moins en moins de personnel compétent en France et les trois cercles répéteurs qui subsistent au Dépôt de la Guerre sont à bout de souffle. Les moyens des Anglais sont devenus bien supérieurs.

Nivellement et nouvelles cartes de la France

Le nivellement

Bien qu'Arago ne se soit pas intéressé directement au problème de la détermination des altitudes (ce que l'on appelle nivellement en topographie), il paraît intéressant d'en dire

quelques mots³⁷. Après que Blaise Pascal eut montré en 1648, par sa célèbre expérience du Puy-de-Dôme, que la pression atmosphérique diminue avec l'altitude, on s'est le plus souvent contenté jusqu'au XIX^e siècle de mesurer les altitudes en transportant un baromètre de la base au sommet des montagnes³⁸ : c'est ce que l'on appelle le *nivellement barométrique*.

Mais la précision ainsi atteinte est insuffisante pour certains usages. C'est ainsi qu'en vue de l'alimentation en eau du Palais de Versailles, un premier nivellement géodésique précis sur de grandes distances, nécessitant l'utilisation de niveaux et d'instruments de visée, est effectué par Picard et Philippe de La Hire avec la participation de Rømer. Pierre Paul de Riquet, le constructeur du canal du Midi, avait en effet eu l'idée que l'on pourrait amener l'eau de la Loire à Versailles. Ce projet n'est guère réalisable, mais les mesures sont excellentes : la différence avec les nivellements modernes n'est que de 60 cm. Cette opération est restée longtemps sans suite : la carte de Cassini, dont les levées se sont terminées en 1789, ne comporte pas d'altitudes. Il faudra attendre le début du XIX^e siècle pour que le nivellement géodésique se généralise.

Nous avons mentionné les mesures de Delambre et Méchain. Mais ils ne sont pas les seuls : d'autres se préoccupent également des altitudes. Par exemple, Reboul et Vidal réalisent de 1787 à 1816 le nivellement des principaux sommets des Pyrénées³⁹, travail repris et considérablement amélioré par les ingénieurs géographes militaires de 1825 à 1827⁴⁰, sans qu'ils puissent cependant résoudre le problème de la différence de niveau entre la Méditerranée et l'Atlantique. Le nivellement devient systématique après 1817, date à laquelle on a décidé d'établir une nouvelle carte de France. Pour définir l'altitude du sommet du Panthéon à Paris, qui est le point fondamental du nouveau nivellement de cette carte, par rapport au niveau moyen de l'Atlantique, on réalise en 1820-1821 sous la direction du Colonel Bonne une nouvelle triangulation de Paris à Cancale. L'erreur moyenne sur l'altitude du Panthéon est estimée par la méthode de Laplace à 9 centimètres, ce qui représente un progrès considérable. On recalcule alors toutes les altitudes de la méridienne de Delambre et Méchain, et ce sont celles-ci qui sont reportées dans la carte au 1/80 000 dont nous allons parler.

Après l'apparition des chemins de fer, le nivellement se fait par nécessité de plus en plus précis, dans le but

de réaliser correctement la pente des voies ferrées et le raccordement des tunnels. On utilise alors des lunettes de nivellement, mieux adaptées que les cercles répétiteurs. La précision sur les grandes distances atteint couramment quelques centimètres. Le premier nivellement général de la France, indépendant de celui de Delambre et Méchain, est terminé en 1864 par Paul-Adrien Bourdalouë et rapporté cette fois au niveau moyen de la Méditerranée à Marseille, qui est toujours utilisé comme niveau de référence des altitudes de la France.

La carte de France au 1/80 000

« En 1802, le gouvernement français fit entreprendre la triangulation de la Suisse, de la Savoie et de la haute Italie, pour servir à la rédaction des cartes géographiques militaires de ces pays, et les coordonner à la carte de la France par Cassini.[...] On reconnut plus tard que cette entreprise, commencée dans des vues militaires, pouvoit, si on la prolongeait à l'ouest jusqu'à l'Océan, être appliquée à la confection d'une nouvelle carte de France [...] en même temps qu'elle pourroit fournir de nouvelles connoissances sur la figure de la Terre⁴¹. »

Donc, le Ministre de la Guerre ordonne en 1811, sur proposition de Laplace, d'établir un réseau de triangulation le long du 45° parallèle depuis l'Océan près de Bordeaux jusqu'à Fiume, en Istrie. Les mesures, effectuées par le Corps impérial des ingénieurs géographes sous la direction des colonels Brossier, Brousseau et Henry, sont suspendues par suite des événements politiques de 1813-1814, puis reprises en 1818 pour être terminées en 1822 en collaboration avec le gouvernement piémontais, avec une prolongation en 1823 côté Ouest jusqu'au phare de Cordouan. Simultanément, on détermine la différence de longitudes entre différents points par la méthode des signaux à feu dont nous avons parlé précédemment : de cette manière, on établit que la différence de longitude entre le clocher de l'église de Marennes et celui de l'église Sainte Justine de Padoue est 12° 59' 3'',720. Comme on en connaît aussi la distance et la différence des latitudes, on obtient enfin ainsi un élément suffisamment précis pour étudier enfin par cette méthode l'aplatissement du globe terrestre⁴². Toute cette campagne a utilisé deux cercles répétiteurs de Gambey, un autre cercle répétiteur plus grand, un théodolite de

Reichenbach, une lunette méridienne de 4 pieds de long, des pendules et des montres. De même, on fait le projet en 1809 de mesurer un arc de parallèle entre Brest et Czernowitz en Autriche, passant par Paris, Strasbourg et Munich. Les mesures, conduites par le Colonel Bonne, sont terminées en 1823 en France, puis rattachées à la triangulation de l'Autriche. Ici encore, on mesure les différences de longitudes en synchronisant les horloges soit avec des signaux à feu utilisant de la poudre à canon, soit en occultant et découvrant un héliostat situé sur une station, qui renvoie la lumière du Soleil sur la suivante.

On déduit de toutes ces mesures un aplatissement du globe terrestre de $1/282$. De son côté, Sabine trouve $1/289$ à partir de ses mesures de la longueur du pendule battant la seconde à différentes latitudes⁴³. Ces valeurs diffèrent de l'aplatissement de Laplace ($1/305$) en raison des erreurs de mesure et du fait que la Terre n'est pas un ellipsoïde de révolution.

Toutes ces opérations paraissent avoir été menées de façon un peu anarchique, mais s'inséreront finalement dans la réalisation de la carte de France, décidée en 1817 et menée sous la direction de Louis Puissant. Celui-ci écrit⁴⁴ :

« Le Gouvernement ayant adopté l'opinion que M. le Comte Laplace a émise à la Chambre des Pairs, dans la session de 1816, sur la nécessité de coordonner entre eux tous les plans parcellaires du Cadastre, et de les lier à un nouveau réseau de triangles couvrant toute l'étendue de la France, et se rattachant lui-même à deux lignes principales, savoir, à la méridienne de Dunkerque et à la perpendiculaire dirigée de Strasbourg à Brest, le corps royal des Ingénieurs-Géographes doit être chargé spécialement de cette grande opération. »

La nouvelle carte est à l'échelle de $1/80\ 000$, un peu plus grande que celle de Cassini qui est de $1/86\ 400$. C'est le premier travail de grande envergure réalisé par les seuls ingénieurs géographes militaires. Le corps des ingénieurs géographes avait précédemment subi de grandes vicissitudes : créé en 1744, supprimé puis vite reconstitué en 1777, il avait alors participé à l'élaboration de la carte de Cassini. Puis il avait été réorganisé en 1793 en même temps que l'on créait le Dépôt de la guerre, avec formation de trois brigades de 12 ingénieurs géographes chacune. Supprimé encore en 1817 en tant que corps, il reprend son autonomie en 1822, cette fois définitivement,

pour devenir le Service géographique des Armées puis beaucoup plus tard, en 1940, l'Institut géographique national. Nous avons déjà vu les ingénieurs géographes à l'œuvre pour la mesure des parallèles, y compris pour la détermination des longitudes qui étaient précédemment l'apanage des astronomes. Ils ont maintenant du pain sur la planche. Pour réaliser la nouvelle carte, la fameuse « *carte de l'État-Major* », ils mesurent cinq nouvelles bases, ajoutent à la méridienne de Delambre et Méchain plusieurs autres chaînes méridiennes, et font la triangulation d'autres chaînes transversales le long de parallèles (figure 6.18).

Toutes ces mesures, qui constituent la géodésie du premier ordre servant d'ossature aux levers de la nouvelle carte, sont entièrement réalisées avec les règles et des cercles répéteurs de Borda, occasionnellement avec des théodolites¹, et s'étendent de 1818 à 1850. Il faut quelquefois construire des signaux provisoires importants comme celui représenté figure 6.19. Simultanément, on réalise des triangulations plus fines, dites du deuxième et du troisième ordre, qui utilisent cette fois des théodolites comme celui de la figure 6.17, et pour la mesure des hauteurs des éclimètres comme celui de la figure 6.20. La détermination des longitudes requiert, pour observer le passage d'étoiles au méridien, des lunettes méridiennes portatives (figure 6.21), et la mesure des latitudes des cercles méridiens portatifs (figure 6.22). Malgré les nouvelles déterminations de l'aplatissement de la Terre dont on vient de parler, la carte de l'État-Major utilise la valeur de $1/305$ recommandée par Laplace. Rétrospectivement, on constate que c'était une sage décision car l'aplatissement terrestre tel qu'il est aujourd'hui mesuré par l'action de la Terre sur les satellites artificiels est de $1/305,455910$, en excellent accord avec ce que Laplace avait déduit de l'action de la Terre sur la Lune⁴⁶.

Après la carte de l'État-Major

Les techniques évoluent assez lentement après l'achèvement de la carte au $1/80\,000$. Les règles de Borda ne

¹ Le Service géographique de l'armée possédait au moins 17 cercles répéteurs dus à divers constructeurs, notamment Bellet et Gambey, et 10 théodolites répéteurs construits par Gambey.

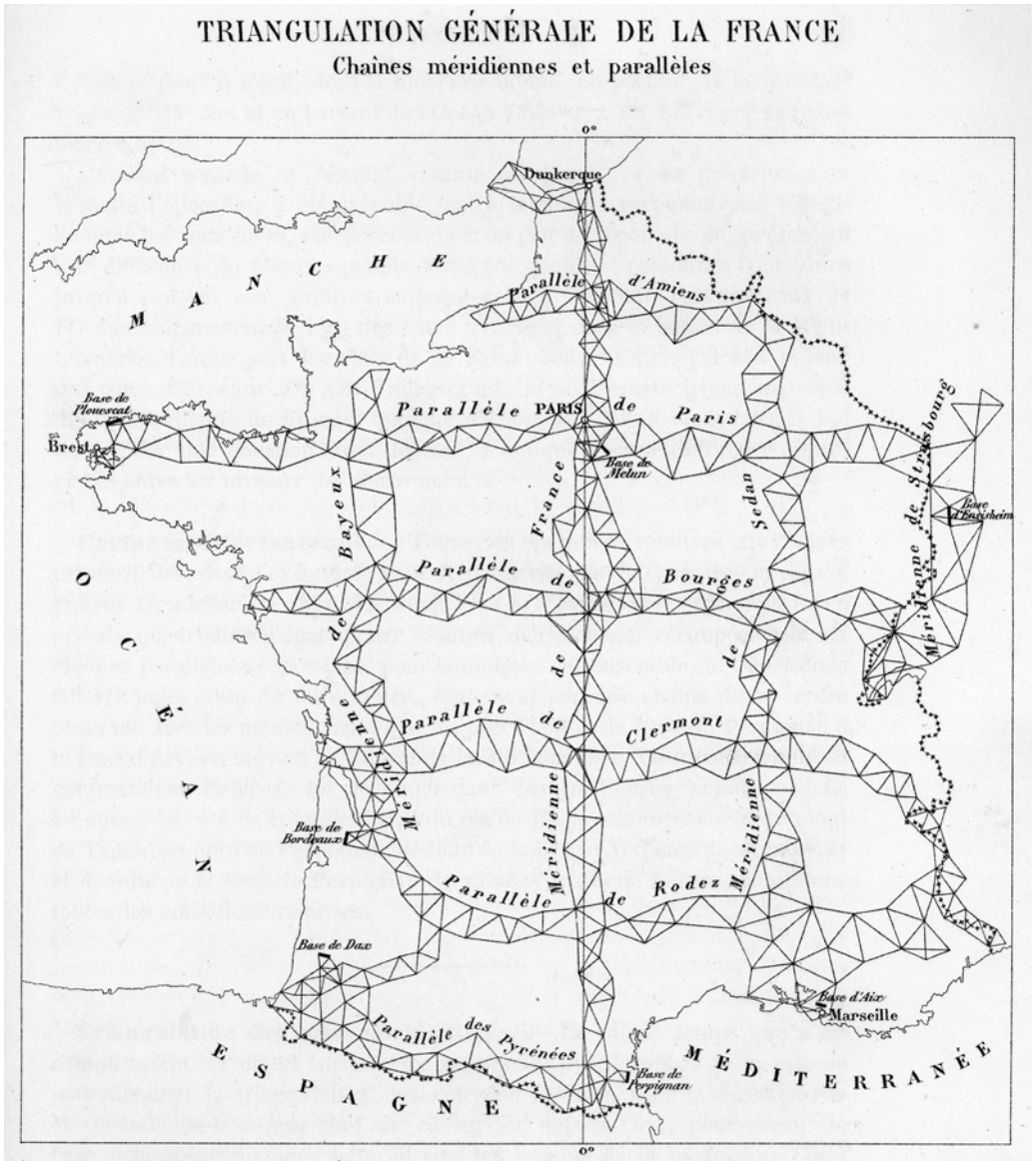


Figure 6.18. Les chaînes méridiennes et parallèles de la première triangulation générale de la France, ainsi que les bases de cette triangulation⁴⁵.

seront remplacées que vers 1850 par d'autres, dues à Ignazio Porro. On persiste à utiliser les cercles de Borda bien qu'on n'en construise pas de nouveaux et que ceux qui subsistent sont en mauvais état. L'usage du théodolite, plus facile à utiliser et tout aussi précis, ne se généralise que pour réaliser la Nouvelle triangulation française, commencée en 1891 par le Service géographique des Armées créé en 1887. Elle ne sera terminée qu'en 1991 sous l'égide de l'Institut géographique national (IGN) qui l'a remplacé, avec un maillage beaucoup plus serré que celui qui a servi à établir la carte de l'État-Major. Les cartes actuelles au 1/50 000 et au 1/25 000 sont basées sur la Nouvelle triangulation. Mais la technique de triangulation est maintenant supplantée par l'utilisation du GPS (Global Positioning System), qui donne, en mode différentiel par rapport à des balises fixes, une exactitude de l'ordre du centimètre aussi bien horizontalement que verticalement⁴⁷.

En ce qui concerne la détermination des longitudes, un progrès fondamental devait être réalisé par l'utilisation du télégraphe électrique pour synchroniser les horloges. Nous en avons vu la première application entre Paris et Greenwich. Arago l'avait prônée dès 1845 en présentant au Bureau des longitudes l'appareil télégraphique de Breguet, alors que ce télégraphe allait juste fonctionner entre Paris et Rouen (voir le chapitre 5)⁴⁸. Il écrit en 1853⁴⁹ :

« Cette idée était si naturelle, qu'elle est née presque aussitôt l'installation des premiers télégraphes, et qu'on ne saurait dire où elle prit naissance. Je puis seulement assurer que le Bureau des longitudes s'en occupa dès l'origine avec persévérance, et qu'en outre, il s'advisa des moyens d'établir une communication directe entre l'Observatoire de Paris et celui de Greenwich, dès qu'il fut question de l'établissement d'un câble sous-marin entre Douvres et Calais. Si ce projet ne s'est pas encore réalisé, on ne doit l'imputer qu'aux difficultés qu'a rencontrées M. Airy pour établir une liaison directe entre l'Observatoire qu'il dirige [Greenwich] et l'une des lignes électriques aboutissant à Douvres et au câble sous-marin. Quant à nous, nous sommes prêts depuis longtemps à faire et à recevoir des signaux. Dans cette vue, une communication a été établie par un fil souterrain qui longe la rue du Faubourg-Saint-Jacques, entre l'une des salles de l'Observatoire et l'Administration centrale située au Ministère de l'Intérieur, rue de Grenelle.[...] Le Bureau

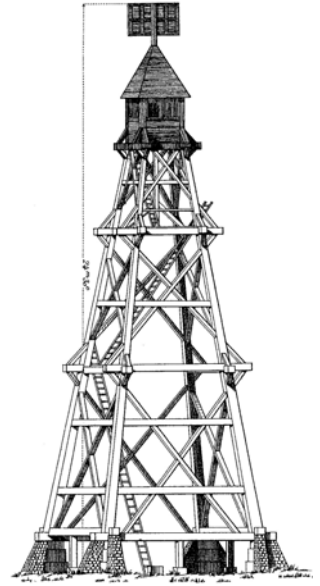


Figure 6.19. Un signal géodésique pour la triangulation de la France.



Figure 6.20. Un éclimètre du milieu du XIX^e siècle, construit par Georg Oberhaeuser. Cet appareil, destiné à mesurer des hauteurs, est muni d'une lunette et d'un cercle divisé, ainsi que d'une boussole pour le repérage de l'azimut.



Figure 6.21. Une lunette méridienne portable construite par Johann Brunner vers 1850. Elle comporte un cercle vertical et deux niveaux à bulle.

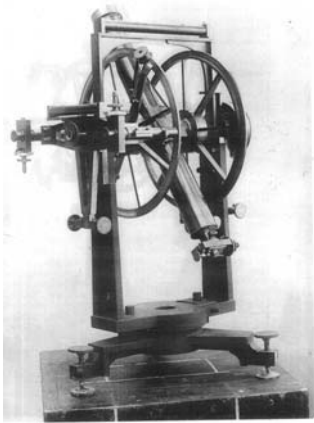


Figure 6.22. Un cercle méridien portatif, vers 1854.

n'attend plus que l'achèvement des dispositions qui se font à Greenwich pour procéder à la liaison de Dunkerque, un des points de la grande méridienne de France, avec l'Observatoire de Greenwich^m. [...] J'ajoute enfin que des arrangements ont été convenus [...] pour qu'on transmette chaque jour l'heure de Paris aux divers ports, tels que Le Havre, Nantes, etc., les navigateurs devant puiser dans ces indications journalières des moyens très-exacts de régler la marche de leurs chronomètres. »

La réalisation de ce programme va prendre du temps. Alors qu'en 1852 les américains avaient déjà mesuré des différences de longitude avec le télégraphe électrique, les premières mesures françaises n'ont lieu qu'en 1856 entre Paris et Bourges, puis en 1861 entre Paris et Le Havre.

Une autre application géodésique est envisagée : la détermination des déviations locales de la gravité. Voici ce que propose en 1852 l'astronome Hervé Faye⁵⁰:

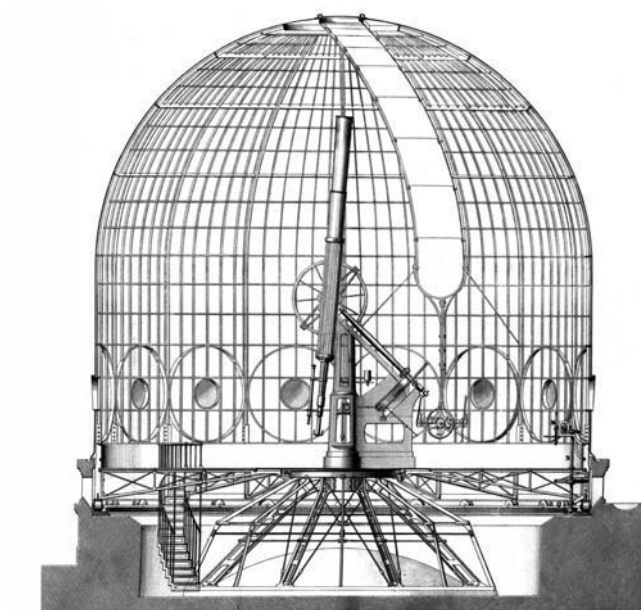
« En annonçant à l'Académie le projet grandiose de relier, dans un même réseau électrique, les chefs-lieux de tous nos départements, M. le Ministre de l'Intérieur ouvre aux sciences une voie nouvelle où elles ne peuvent manquer d'entrer.[...] Je propose de déterminer, par les procédés nouveaux dont la science dispose, non-seulement les longitudes, mais encore les latitudes astronomiques de tous nos chefs-lieux, et de les comparer aux coordonnées géodésiques déjà connues, afin de compléter les travaux antérieurs et de mettre en relief les irrégularités locales dont la surface du sphéroïde terrestre peut être affectée sur notre sol.[...] Ces travaux, on ne les recommencera plus nulle part sur le globe, si ce n'est, peut-être, dans un intérêt purement théorique. »

Si le « projet grandiose » du Ministre sera effectivement réalisé, on ne peut en dire autant du reste. Il faudra attendre la gravimétrie systématique, la géodésie spatiale et le GPS pour bien connaître les irrégularités locales du géoïde.

^m Tout était prêt fin avril 1853 : voir CRAS 36 (1853) p. 740.

Chapitre 7

Arago et l'Observatoire de Paris



La grande coupole de l'Observatoire de Paris, construite par de Gisors et Travers en 1847.

Arago a fait toute sa carrière à l'Observatoire de Paris : il y est entré en 1805 comme secrétaire-bibliothécaire, à l'âge de 19 ans, y est devenu membre titulaire du Bureau des longitudes en 1822, et en a été nommé en 1834 directeur des observations, c'est à dire directeur de fait, un titre qu'il a gardé jusqu'à sa mort en 1853, à l'âge de 67 ans. Il n'est donc pas étonnant qu'il ait marqué l'Observatoire de sa forte personnalité. C'est ce que nous allons constater dans ce chapitre ; mais voyons d'abord dans quel état il a trouvé l'Observatoire à son arrivée.

L'Observatoire de Paris avant Arago

Les débuts

L'histoire de l'Observatoire de Paris au xvii^e et au xviii^e siècles est bien connue grâce aux mémoires de Cassini IV¹ et à l'ouvrage de Charles Wolf², qui est d'ailleurs en grande partie basé sur ces mémoires. Fondé en 1667 pour servir de lieu de réunion de l'Académie des sciences créée l'année précédente, de dépôt des machines et modèles qui lui étaient présentés, et aussi d'observatoire astronomique, le bâtiment est vite entièrement dévolu à l'astronomie, les académiciens trouvant ce lieu alors situé en pleine campagne trop éloigné de leur résidence. Mais la construction de Claude Perrault, toute magnifique qu'elle soit (figure 7.1), n'est pas bien adaptée à l'astronomie^a ... et ne l'est toujours pas aujourd'hui : d'après Cassini I, qui a d'ailleurs exigé des modifications importantes³ à son arrivée à Paris en 1669 :

« Il suffisoit à Perrault, d'avoir imposé à la façade et à la masse de l'Observatoire ce caractère grave et grandiose convenable à sa destination. C'étoit là le cachet que son génie étoit jaloux d'y imprimer. Du reste peu lui importoit que l'astronome y put observer un peu plus ou un peu moins commodément. »

^a Cependant au xvii^e siècle on observait à l'extérieur, les objectifs des lunettes étant souvent posés au bord de la terrasse qui était à une hauteur suffisante.

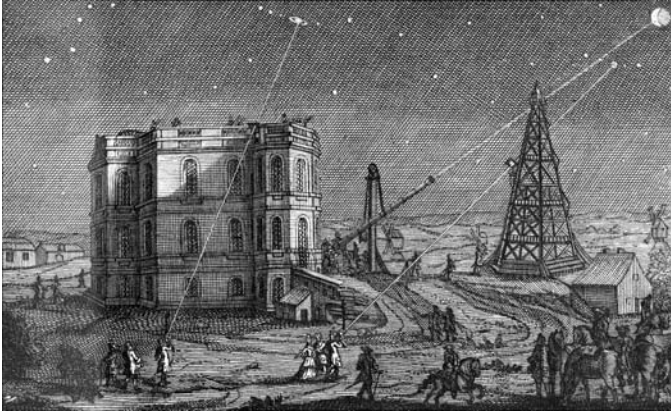


Figure 7.1. L'Observatoire de Paris en 1705, vu de l'Ouest. On ne pouvait guère observer qu'à l'extérieur du bâtiment, soit en posant l'objectif sur le bord de la terrasse du haut du bâtiment ou sur la construction en bois, qui n'est autre que la tour de Marly récupérée, soit avec une « lunette à faire peur aux gens », visible au fond.

Le premier responsable de l'Observatoire, qui n'a pas le titre de directeur, est l'italien Giovanni Domenico Cassini (Cassini I) (figure 4.15), appelé par Jean-Baptiste Colbert. Déjà célèbre dans toute l'Europe, il s'adaptera bien à sa nouvelle vie, francisera ses prénoms en Jean Dominique et acquerra la nationalité française. Excellent observateur et aussi remarquable animateur, il avait découvert avant son arrivée à Paris la rotation de Jupiter et de Mars, suspecté celle de Vénus et établi des éphémérides des satellites de Jupiter dont il avait vu l'ombre sur la planète. Plus tard, il observera la division de l'anneau de Saturne qui porte son nom, quatre petits satellites de cette planète et établira une magnifique carte de la Lune. Il jouera également un grand rôle dans la découverte de la nature finie de la vitesse de la lumière (voir le chapitre 4). Colbert et Cassini attireront à l'Observatoire, nous l'avons vu, des savants étrangers remarquables comme Rømer ou Huygens. Trois autres Cassini succéderont de père en fils à Jean Dominique. Ils s'occuperont aussi bien de géodésie que d'astronomie.

La météorologie et la physique du globe font aussi partie des attributions des astronomes : l'Observatoire tient depuis sa fondation un registre d'observations météorologiques, puis d'observations magnétiques. Nous allons résumer rapidement son histoire de 1777 à l'arrivée d'Arago en 1805, n'en retenant que ce qui est utile pour comprendre son état à cette dernière date. L'usage des instruments d'observation dont nous allons parler est résumé dans l'encadré 7.1.

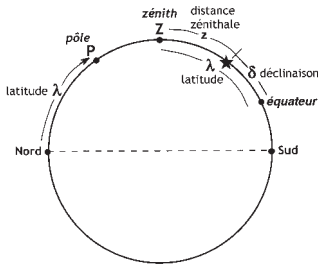


Figure 7.2. Relations entre la distance zénithale z et la déclinaison δ d'une étoile avec la latitude λ lors de son passage au méridien. La figure est faite dans le plan du méridien local. La latitude λ est la hauteur angulaire au dessus de l'horizon du pôle P de l'axe de rotation de la Terre.

Encadré 7.1. L'usage des instruments d'astronomie au XVIII^e et au XIX^e siècles⁴

La plupart des instruments de l'astronomie à ces époques étaient réservés à la mesure de la position des étoiles, des planètes et des comètes. Dans certains cas, ils servaient aussi à la géodésie. On y trouvait des cercles entiers, des quarts de cercles ou des sextants (sixièmes de cercle), munis de graduations et sur lesquels pivotait une lunette, quelquefois deux. Certains, les muraux, étaient fixés verticalement dans le plan du méridien le long d'un mur, et étaient utilisés uniquement à la mesure de la distance zénithale des étoiles à leur passage au méridien, dont on pouvait déduire la latitude du lieu si la déclinaison de l'étoile était connue, ou inversement la déclinaison, la latitude étant préalablement déterminée (figure 7.2). D'autres étaient mobiles ; on les plaçait dans un plan vertical, et en repérant la graduation correspondant à l'horizontale ou à la verticale grâce à un niveau ou à un fil à plomb, on pouvait mesurer la distance zénithale d'un astre dans une orientation quelconque, ou pour la topographie la hauteur d'un repère. En les plaçant dans un plan quelconque, ils servaient aussi à mesurer la distance angulaire entre deux étoiles éloignées, ou entre deux repères terrestres : c'était l'usage principal des cercles répétiteurs de Borda (voir le chapitre 6). Les théodolites ne comportaient au début qu'un cercle horizontal, puis furent pourvus de deux cercles orthogonaux, l'un horizontal et l'autre vertical, et d'une ou deux lunettes, ce qui permettait de mesurer à la fois les azimuts et les hauteurs (figure 7.3).

Les lunettes méridiennes, ou lunettes des passages, étaient mobiles autour d'un axe horizontal Est-Ouest et ne pouvaient donc viser que dans le plan du méridien ; elles servaient à déterminer l'instant de passage des étoiles au méridien, repéré par une horloge, et donc à mesurer le temps et indirectement les longitudes, ou l'ascension droite des étoiles. Afin d'assurer la stabilité des mesures, on les réglait sur des mires placées au Sud ou au Nord de l'observatoire. D'autres lunettes méridiennes étaient transportables pour une utilisation en campagne : on devait alors orienter

leur axe, en général par des observations de l'étoile polaire, et le rendre horizontal grâce à un niveau.

Les lunettes ordinaires, devenues achromatiques vers 1758 grâce à l'invention par Chester Moor Hall et John Dollond de l'objectif à deux (ou quelquefois trois) lentilles de verres différents, crown et flint, servaient à l'observation des planètes et des satellites, de la Lune, du Soleil, des comètes, et bien entendu des étoiles. Il en était de même des télescopes à miroir inventés par Newton, que William Herschel a aussi pointé sur des nébuleuses et sur des champs de la Voie lactée. Ces télescopes présentaient l'inconvénient que leur miroir de bronze se ternissait rapidement par oxydation profonde et devait être souvent repoli : ce n'est qu'après la réalisation par Léon Foucault de miroirs de verre argenté à la fin des années 1850 qu'ils supplantèrent très progressivement les lunettes. Les lunettes étaient également utilisées pour mesurer de petites distances angulaires entre des étoiles (étoiles doubles), ou pour repérer la position des planètes et des comètes par rapport aux étoiles voisines : on se servait à cet effet de micromètres oculaires ou d'autres dispositifs. Il était alors avantageux de les munir d'une monture *parallatique*^b (on dit aujourd'hui : équatoriale), dont un des deux axes était parallèle à l'axe de rotation de la Terre si bien qu'il suffisait d'un mouvement autour de cet axe pour compenser cette rotation et maintenir l'objet fixe dans la lunette ; des cercles gradués permettaient de trouver facilement l'objet à observer si l'on connaissait sa position, ce qui n'était pas commode avec la monture habituelle plus simple, où l'un des axes était vertical et l'autre horizontal. Certaines de ces montures furent munies dès la première moitié du XIX^e siècle d'un moteur (mouvement d'horlogerie) permettant de suivre continuellement une étoile.

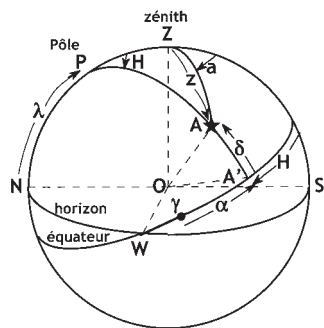


Figure 7.3. La sphère céleste. Le ciel est représenté par une sphère centrée en O sur l'observateur. L'horizon est représenté avec trois points cardinaux NWS, ainsi que l'équateur et son pôle Nord P. Le mouvement diurne fait tourner les astres autour de l'axe de la Terre OP, de l'Est vers l'Ouest. La position d'une étoile A peut être repérée, soit en coordonnées horizontales par deux angles, son azimut a et sa distance z au zénith, soit en coordonnées équatoriales par son angle horaire H et sa déclinaison δ . α est son ascension droite, mesurée par rapport au point γ , intersection de l'équateur et de l'écliptique (non représenté), qui est la trajectoire annuelle du Soleil.

^b D'après Arago (OC t.12, p. 32) « la machine parallactique ou parallatique des observateurs modernes s'appelle ainsi, parce qu'elle est destinée à suivre les astres dans leurs parallèles diurnes ». Le terme « parallactique » est une attraction injustifiée par le mot « parallaxe », qui n'a rien à voir.

Les instruments de la fin du xviii^e siècle

Comme il est impossible de faire des observations depuis l'intérieur du bâtiment de Perrault, il faut construire à l'est de ce bâtiment des cabinets d'observation, qui seront toujours en usage en 1805. Une première tranche de construction se termine en 1777 (figure 7.4), et une seconde en 1781 (figure 7.5).

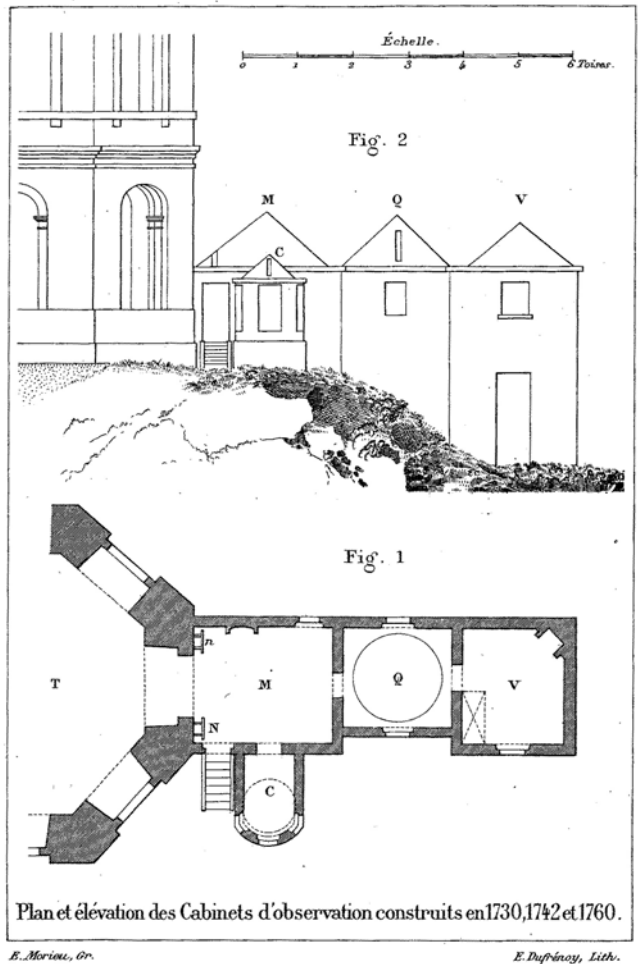


Figure 7.4. Les cabinets d'observation de l'Observatoire de Paris vers 1777 ; on voit à gauche une partie de la tour octogonale Est du bâtiment de Perrault. Les cabinets sont munis de toits ouvrants.

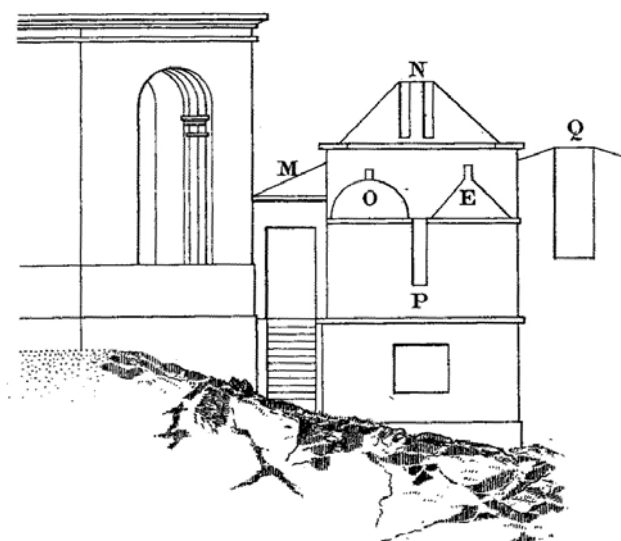
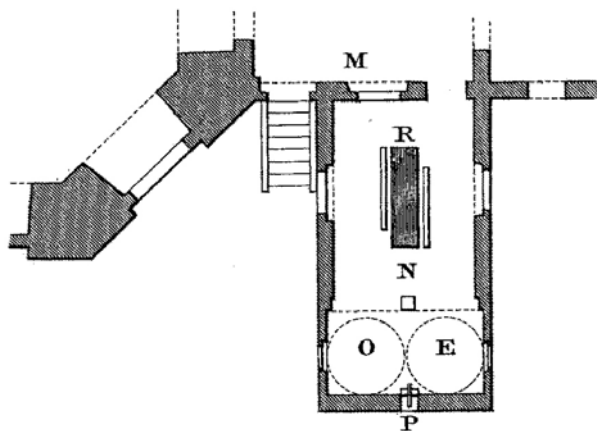


Figure 7.5. Plan et élévation du « Cabinet du mural » construit en 1780-1781 du côté est de l'Observatoire. On pouvait placer un quart de cercle méridien ou un cercle méridien entier de chaque côté du mur central RN. Comme les trois cabinets d'observation antérieurs (figure 7.4), qui sont en partie visible à l'arrière de l'élévation, le cabinet du mural a un toit ouvrant.



Des difficultés variées et les vicissitudes de l'époque révolutionnaire font que ces cabinets ne seront que tardivement équipés d'instruments.

Une lunette méridienne due à l'anglais Ramsden, dont l'objectif a 11 cm de diamètre, livrée en 1803 après la mort de celui-ci, est installée en août de la même année dans un des cabinets d'observation en remplacement d'une plus

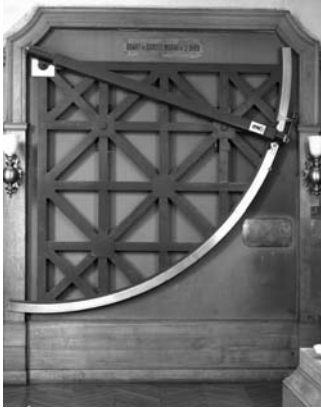


Figure 7.6. Le quart de cercle de Bird. Il est conservé dans la grande galerie de l'Observatoire.

ancienne, due à Le Noir, qui est transférée à l'Observatoire de l'École militaire.

D'un côté du mur du cabinet du mural, on trouve un grand quart de cercle mural construit par John Bird à Londres en 1752 (figure 7.6), destiné à observer la déclinaison des étoiles qui passent au Sud du zénith, et de l'autre côté un cercle dû à l'anglais Sisson, qui joue le même rôle pour les étoiles culminant au Nord du zénith.

On peut s'étonner de trouver dans ces cabinets trois instruments anglais. Cassini IV nous explique pourquoi :

« Au commencement et jusqu'au milieu du règne de Louis XV, l'Observatoire avait été muni [...] de muraux, de grands cercles mobiles, ouvrages des Langlois, des Canivet, des Lennel, qui étaient en ce tems-là les plus célèbres constructeurs d'instrumens d'astronomie. Mais au moment où je pris la direction de l'Observatoire [1784], ces vieux talens étaient éclipsés par les Bird et les Ramsden, artistes anglais qui avaient porté leur art à la plus haute perfection, laissant bien loin derrière eux les Français, à qui ils avaient enlevé presque entièrement le commerce des instrumens d'optique et de mathématiques. »

Par ailleurs, Cassini IV a fait construire sur la terrasse du haut du bâtiment un petit ensemble qui comporte à l'est un pluviomètre, et au sud et à l'ouest deux emplacements possibles pour des instruments astronomiques (figure 7.7). À l'arrivée d'Arago, la tourelle Nord-Ouest contient une petite lunette à monture équatoriale (on dit en abrégé : équatorial), livrée en 1804 par Bellet, dont l'objectif a 65 mm d'ouverture.

Il y a aussi à l'Observatoire une petite lunette de trois pieds et demi de long, construite par Charité, un télescope anglais de 7 pouces d'ouverture de Dollond, plusieurs pendules dont une de Ferdinand Berthoud et des instruments de météorologie. Mais surtout, l'Assemblée nationale y a fait transporter « tous les instrumens d'astronomie appartenant à la Nation », dont l'inventaire fait en 1793 par Étienne Le Noir, Jacques Charles et Jean Fortin se trouve dans les *Mémoires* de Cassini IV. On y trouve de nombreuses pendules, un superbe quart de cercle mobile de 6 pieds de rayon construit par Langlois en 1742, un autre quart de cercle et un cercle entier, et une lunette méridienne de Charité de 3 pieds et demi. Il y a aussi des instrumens pour la météorologie et la mesure du champ magnétique terrestre, une dizaine de lunettes

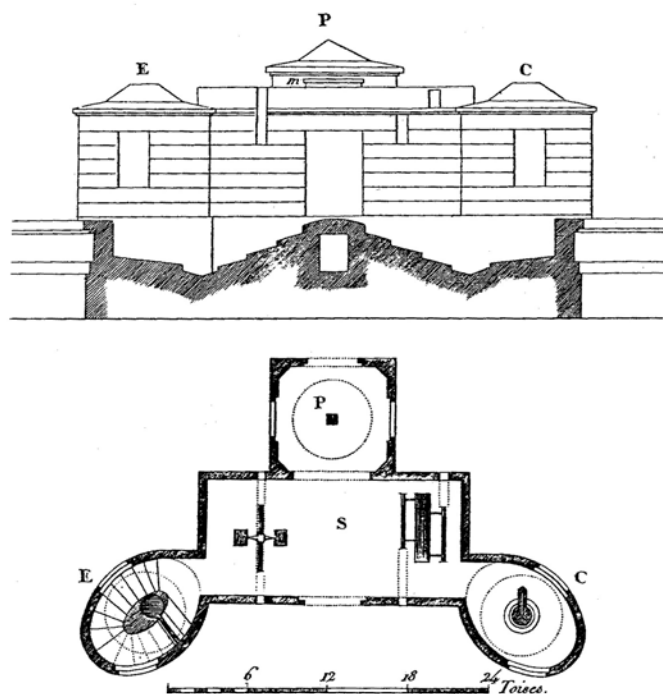


Figure 7.7. L'observatoire de la terrasse du haut du bâtiment (plan, le nord étant vers le bas, et élévation vue du nord). Un pluviomètre se trouve en haut de l'escalier (voir figure 9.2), et deux emplacements sont disponibles pour des instruments.

dont l'une, « à prisme de cristal d'Islande [...] pour la mesure des petits angles », provient sans doute de Rochon (voir le chapitre 4), et enfin plusieurs télescopes dont un de 6 pieds de long dû à Carroché, à miroir de platine et monté « suivant la méthode d'Herschell [sic] ».^c

Le plus spectaculaire, sinon le meilleur de ces instruments, est « le grand télescope de Passi », de 22 pieds de long et 18 pouces (49 cm) de diamètre, construit en 1759-1761 par un religieux bernardin, Dom Noël, pour le cabinet de physique et d'optique de Louis XV à la Muette. D'après Lalande, il a coûté plus de 500 000 francs⁵. La monture de ce télescope a été modifiée en 1800 par le mécanicien Trémel, et Carroché lui a alors fabriqué un nouveau miroir

^c Ce télescope avait un miroir de 7 pouces 1/2 (20 cm) de diamètre. Carroché rêvait d'un télescope de 40 pieds (13 m) de long, avec un miroir de platine pour lequel 103 kg de ce métal précieux étaient déjà réservés ; mais il en aurait fallu une tonne, et le projet échoua.

de bronze^d. Ce télescope est entreposé dans la galerie de l'Observatoire, qui est de plain-pied avec le jardin au sud. L'architecte de l'Observatoire, Antoine Laurent Thomas Vaudoyer, doit agrandir la porte centrale en 1801 et établir un revêtement de dalles de pierre sur la terrasse au Sud du bâtiment pour pouvoir sortir cet encombrant instrument lorsqu'on veut s'en servir. Carroché polit encore en 1805 le miroir qui s'est oxydé, mais l'oxydation s'établit sur la nouvelle surface et devient très gênante en 1807 ; on décide alors de laisser le miroir tel quel. Le télescope n'est plus là que pour satisfaire la curiosité du public auquel on ne montre généralement pas les autres instruments, et sera démonté en 1841.

La bibliothèque de l'Observatoire est très riche : elle a été constituée par Cassini IV qui lui a donné ses propres livres et revues et en a acheté d'autres avec l'aide de son collègue Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande, le neveu de Jérôme de Lalande. On y trouve par exemple la principale revue scientifique anglaise, les *Philosophical transactions of the Royal society of London*, depuis leur début^e.

L'Observatoire du Bureau des longitudes⁶

L'Observatoire à l'arrivée d'Arago

Lorsque Arago est nommé secrétaire-bibliothécaire du Bureau des longitudes en 1805 et s'installe à l'Observatoire, alors dirigé par Alexis Bouvard (figure 2.10), il y trouve les instruments que nous venons de mentionner. D'autres vont bientôt arriver : un vieux télescope de Short (figure 7.8) acheté 3 000 francs en 1807 aux héritiers



Figure 7.8. Le télescope de Short de l'Observatoire de Paris.

^d Jusque vers 1860, tous les télescopes avaient un miroir en bronze spécial assez réfléchissant, dit *speculum*. Ce bronze se ternissait assez rapidement par une oxydation profonde, et il fallait alors le retravailler et le repolir complètement ou le remplacer. On a quelquefois utilisé le platine, mais son prix était prohibitif et on le réservait plutôt à des instruments de métrologie.

^e Arago s'est toujours intéressé à la bibliothèque. Il lui a par exemple donné les précieux registres d'observation de Lalande, qui lui avaient été offerts par le neveu de ce dernier.

de Le Monnier, une bonne lunette de Dollond de 91 mm d'ouverture, une autre de Lerebours, et divers instruments mis en dépôt à l'Observatoire et utilisés occasionnellement. En 1810, la « *lunette de l'Empereur* », en fait une longue-vue de Lerebours que Napoléon I^{er} a utilisée en 1803-1804 au camp de Boulogne, est déposée à l'Observatoire (figure 7.9), avant d'être envoyée en 1814 à l'École militaire. Mais aucune grande lunette n'est disponible, et le seul grand télescope est inutilisable.

Un magnifique instrument est livré en 1811 : le grand cercle répétiteur astronomique construit à Munich par Georg Friedrich von Reichenbach, Joseph von Utschneider et Joseph Liebherr pour Laplace, qui l'a payé 6 540 francs, plus 545 francs pour le transport, et qu'il a aussitôt donné à l'Observatoire (figure 7.10). Il s'agit d'une sorte de grand théodolite à une seule lunette, avec un cercle vertical et un cercle horizontal. Aucun constructeur français n'ayant alors la possibilité de construire d'aussi grands cercles divisés (3 pieds de diamètre), Laplace l'avait commandé à l'étranger. Ce cercle est installé dans la tourelle centrale du pavillon de la terrasse du haut du bâtiment. On l'utilise pour mesurer la position d'étoiles qui devaient être occultées par la Lune, afin de perfectionner les tables de notre satellite, chères à Laplace. Cependant cet instrument, qui est confié en 1812 à Arago et à Mathieu, ne servira pas beaucoup, au grand dam de Laplace.



Figure 7.9. La « lunette de l'Empereur », à l'Observatoire de Paris. Sa monture en bois, postérieure, est due à Cauchoix.

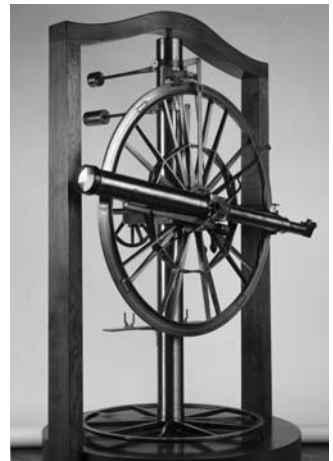


Figure 7.10. Le cercle de Reichenbach de l'Observatoire de Paris.

Les instruments d'Arago

L'influence d'Arago à l'Observatoire croît rapidement après son retour d'Espagne et son élection à l'Académie des sciences. Elle culmine en 1834 lorsque le Bureau des longitudes le nomme Directeur des observations. Mais le Bureau n'a pas attendu pour améliorer le parc instrumental. La situation en 1823 nous est très bien connue grâce à un reportage réalisé par Jean-Alfred Gautier⁷, directeur de l'Observatoire de Genève. Il y voit les instruments dont nous avons parlé, et un nouveau cercle méridien entier de 1,85 m de diamètre construit par Fortin avec un objectif de Lerebours ; ce cercle, installé en 1822 dans les cabinets d'observation et qui a coûté 12 000 francs, est « *dû à la munificence de S.A.R. le duc d'Angoulême, aujourd'hui Dauphin de France* », et vaut à Fortin la médaille d'or à

l'Exposition des produits de l'industrie française de 1823. Gautier mentionne aussi des instruments perfectionnés destinés à la mesure du champ magnétique terrestre, dont nous parlerons au chapitre 9.

Il arrive ensuite à l'Observatoire en 1823 une lunette de Lerebours avec un objectif achromatique de 9 pouces (24,4 cm) d'ouverture, qui a coûté 14 500 francs et a aussi valu à son fabricant une médaille d'or en 1823. Elle est mobile et est probablement entreposée avec d'autres instruments dans le grand cabinet octogonal au bas de la tour Est. En 1834, il y a aussi une lunette (ou au moins un objectif) de 32 cm d'ouverture de Lerebours. En 1835 Arago observe la comète de Halley avec la lunette de 24,4 cm⁸. Bien plus tard, en 1851, il mentionne une autre lunette, de 18 ou 19 cm d'ouverture, qui a été déposée en 1816 à l'Observatoire par Lerebours⁹ : il envisage alors de la placer sur une monture équatoriale dans la coupole de la tour Est, en attendant la lunette définitive dont nous reparlerons plus loin¹⁰. En 1848, le passage de Mercure devant le Soleil est observé avec quatre instruments¹¹ : une lunette de « *Cauche* » (Cauchoux ?) de 13,7 cm (5 pouces) d'ouverture, une lunette de Lerebours de 14,7 cm (5,4 pouces)^f, la lunette « *de 20 cm d'ouverture* » de Lerebours (ou plutôt de 18 ou 19 cm, dont nous venons de parler), et la vieille lunette de Dollond, de 9,1 cm (3,4 pouces) de diamètre. Ni la lunette de 24,4 cm de Lerebours, ni celle de 32 cm ne sont utilisées, en supposant qu'elles soient présentes ; l'objectif de 24,4 cm est cependant toujours là, car Le Verrier le fera remonter en 1854 sur une monture parallatique de Secrétan¹². Nous constatons qu'il règne une certaine confusion sur les lunettes de l'Observatoire, dont certaines y sont seulement déposées par leurs constructeurs, sans doute dans l'espoir qu'elles soient achetées par le Bureau des longitudes.

D'autres instruments sont en construction vers 1823 :

- une nouvelle lunette méridienne de Gambey (figure 7.11), commandée en 1823 par le Bureau des longitudes pour remplacer l'instrument de Ramsden, dont l'optique est médiocre et qui sera transporté à l'Observatoire de Marseille ; elle coûte 12 000 francs, et avec son objectif de 15 cm de diamètre dû à Cauchoux, c'est la plus grande du monde. Elle n'est cependant installée qu'en 1834 ;

^f Il s'agit peut-être d'une lunette de « 6 pouces » achetée à Lerebours en 1831.

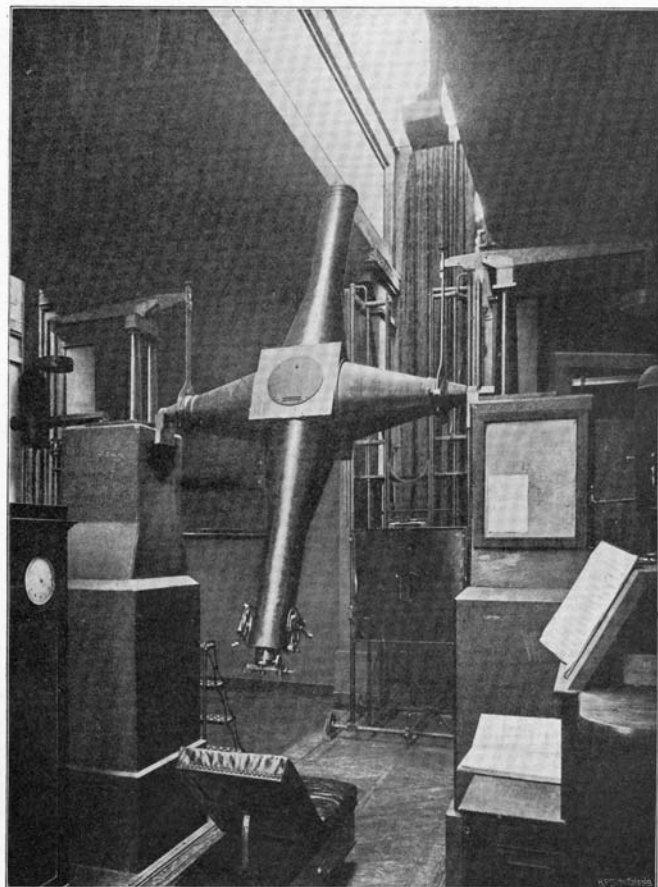
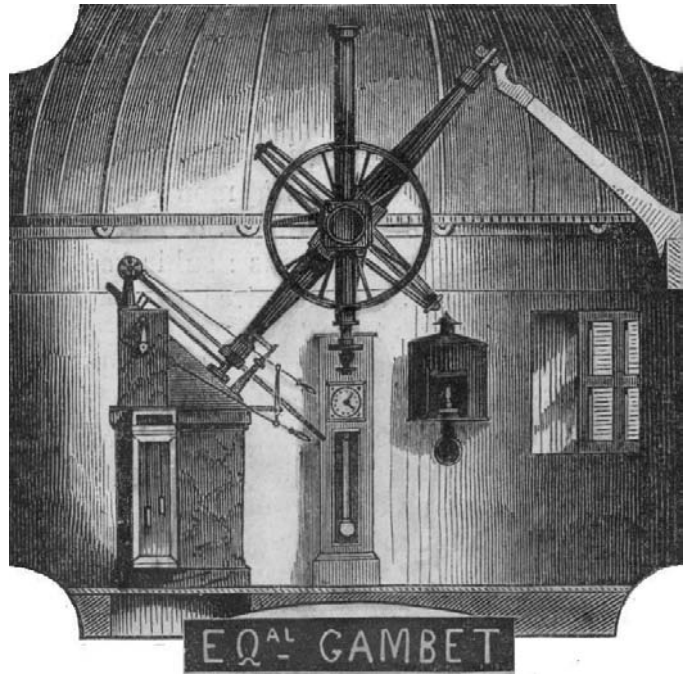


Figure 7.11. La lunette méridienne de Gambey. Photo reproduite par Repsold (1914).

– un équatorial d'un prix de 13 500 francs, également dû à Gambey (figure 7.12), avec un objectif de Lerebours de 10 cm de diamètre et 1,60 m de distance focale qui a coûté environ 3 000 francs de plus. Il doit remplacer la petite « *machine parallaxique* » de Bellet installée dans la tourelle Nord-Ouest du pavillon de la terrasse du haut du bâtiment, qui vient d'être envoyée à l'Observatoire de Marseille¹³. Bien qu'il ait valu à son auteur « *l'admiration des artistes à l'exposition [...] de 1823* », l'équatorial de Gambey n'est monté qu'en 1826 dans la tourelle Nord-Ouest. Il mérite quelques explications complémentaires.

Cet équatorial, qui est selon Arago « *un des plus beaux instruments qui soient jamais sortis de la main des hommes* », est destiné à mesurer la position des astres. Il est pour

Figure 7.12. L'équatorial de Gambey sous sa coupole tournante. Gravure du *Monde Illustré* de 1862, d'après celle de *l'Astronomie populaire*.



cela muni de deux cercles divisés de trois pieds (presque un mètre !) de diamètre, permettant respectivement de repérer l'angle horaire et la déclinaison de l'objet visé. Un micromètre également dû à Gambey permet de mesurer la position des comètes par rapport aux étoiles voisines, et un oculaire puissant est utilisé pour séparer les étoiles doubles. Un moteur à mouvement d'horlogerie entraînant l'axe polaire (parallèle à l'axe de rotation de la Terre) permet de compenser la rotation terrestre pour suivre les étoiles dans leur mouvement diurne. La difficulté d'un tel entraînement est qu'il faut transformer le mouvement saccadé dû à l'échappement de l'horloge en un mouvement doux et continu. Léon Foucault en dit¹⁴ : « on n'a pas cru pouvoir mieux faire que de recourir à une horloge construite d'après les principes ordinaires, à une horloge d'échappement, [...] et au lieu de faire agir l'horloge sur la lunette, on s'est vu forcé d'interposer un rouage à ressort spiral et à volant, destiné à effacer plus ou moins complètement les saccades de l'horloge. [...] On lui reproche une certaine complication ». Foucault fera beaucoup d'efforts pour résoudre le problème au moyen de pendules coniques et de régulateurs, mais sans y réussir complètement¹⁵. En 1832, comme on trouve le

local où il est placé trop exigü, l'équatorial de Gambey est permuté avec le cercle de Reichenbach et installé dans la tourelle centrale plus vaste, pour laquelle un toit tournant est construit à grands frais par le mécanicien Picard.

On songe aussi à reconstruire les cabinets d'observation, qui sont vétustes et peu commodes. Léon Marie Dieudonné Biet, l'architecte de l'Observatoire, prépare des projets en 1828, mais se montre ensuite d'une indolence coupable si bien qu'il ne se passe rien pendant plusieurs années. Les travaux ne commencent qu'en mars 1832, pour se terminer en février 1834. Les observations méridiennes se sont arrêtées en 1829, pour ne reprendre qu'en 1837 après la réinstallation et les ajustements des instruments. La figure 7.13 montre l'aspect de l'Observatoire à cette époque.

Le dernier instrument installé à l'Observatoire du vivant d'Arago est un cercle mural de Gambey, placé en 1843 dans les cabinets refaits (figure 7.14). Son objectif a 12,5 cm de diamètre. La figure 7.15 montre la disposition de la lunette et du cercle mural de Gambey.

On constate que la déficience des constructeurs d'instruments regrettée par Cassini IV à la fin du siècle précédent a été comblée : on trouve maintenant que les instruments anglais tant vantés ne sont pas exempts de défauts, et l'on fait systématiquement appel aux constructeurs français. Bigourdan note dans son *Histoire du Bureau des longitudes* (voir la note 6), en listant les candidats à la place d'artiste laissée vacante par la mort de Carroché en 1813 (Bellet, Breguet, Cauchois, Fortin, Le Noir, Henri Lepaute, Lerebours, Richer) :

« Les listes de présentation pour la place [...] montrent avec quel succès, depuis le XVIII^e siècle, les efforts de Cassini IV,

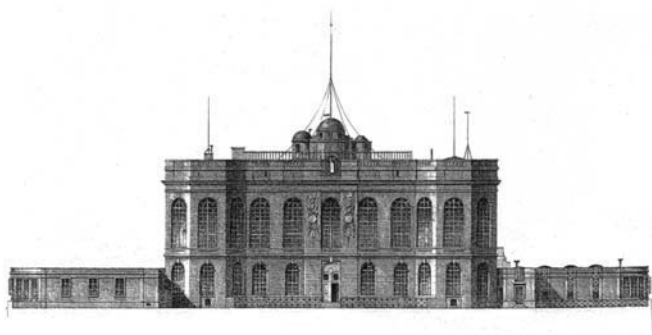
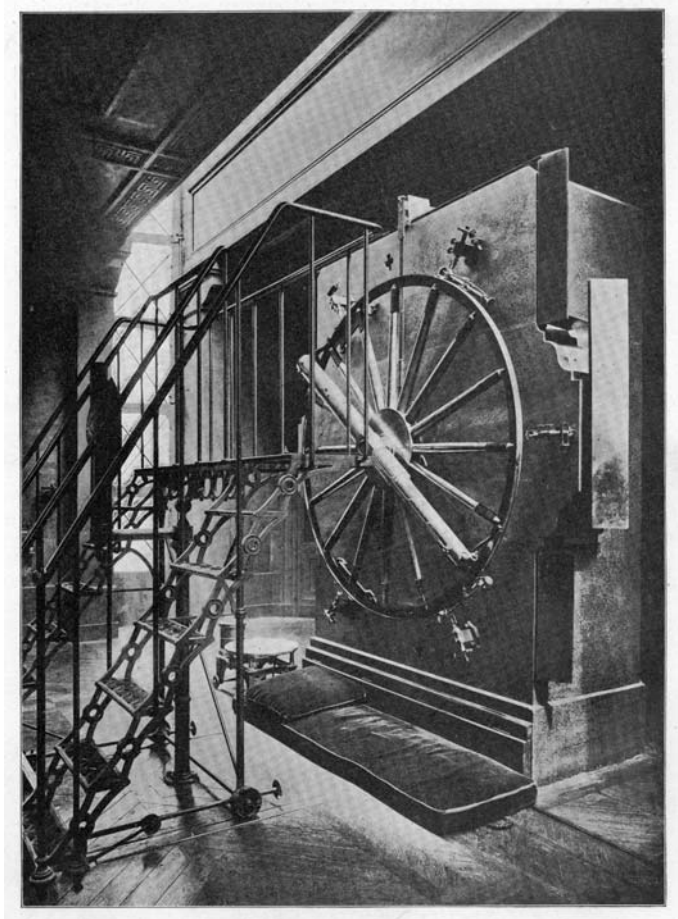


Figure 7.13. L'Observatoire de Paris vers 1837, vu du Sud. On distingue à droite les cabinets d'observation méridienne avec leur toit et fenêtres ouvrants, et sur la terrasse le petit observatoire.

Figure 7.14. Le cercle méridien mural de Gambey.
Le diamètre du cercle était de 2 m et l'objectif avait 12 cm de diamètre.
Photo reproduite par Repsold (1914).



continué par le Bureau des longitudes, nous avaient affranchis de la construction étrangère. »

Les membres du Bureau des longitudes, et particulièrement Arago, ont certainement été pour beaucoup dans ce progrès, car ils se sont faits les promoteurs assidus de l'instrumentation française.

Le grand équatorial de la tour Est¹⁶

Cependant, les anglais détrônés, une nouvelle concurrence s'installe : celle des constructeurs allemands. Nous avons vu que Laplace a dû faire appel à une firme de Munich pour réaliser son grand cercle en 1811.

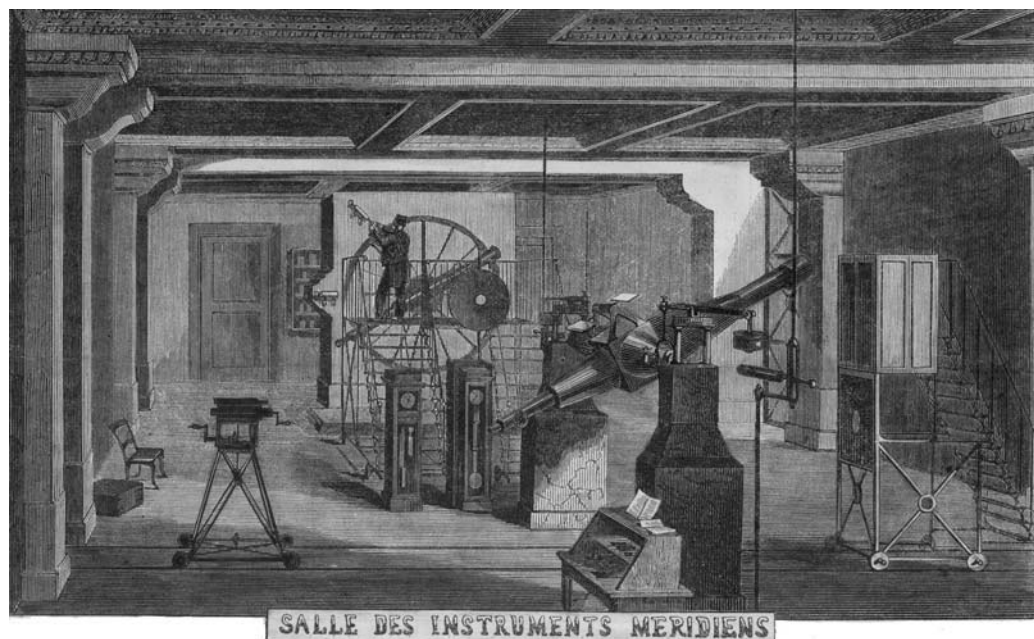


Figure 7.15. Le cabinet d'observations méridiennes de l'Observatoire de Paris. On y voit au premier plan la lunette méridienne de Gambey, et au second plan son cercle méridien mural. Gravure du *Monde illustré* de 1862.

Le constructeur allemand le plus célèbre n'est autre que Fraunhofer. Associé à Joseph von Utzschneider, il construit en 1824 pour l'observatoire de Wilhelm Struve à Dorpat (aujourd'hui Tartu en Estonie) une grande lunette de 23 cm de diamètre dont la qualité optique fait l'admiration du monde entier. Georg Merz et Franz Joseph Mahler, successeurs de Fraunhofer et Utzschneider, construisent en 1839 une lunette encore plus grande (38 cm de diamètre) pour l'observatoire de Pulkovo en Russie, dont Struve avait été nommé directeur en 1834 ; il y fera de nombreuses observations d'étoiles doubles, de même que son fils Otto. Arago veut évidemment un instrument aussi grand pour l'Observatoire de Paris, afin d'y observer les étoiles doubles qui sont le point faible de l'Observatoire. Il y a à Paris des opticiens — Cauchoix, Noël-Jean Lerebours et son fils Nicolas — qui se sont déjà montrés capables de construire de grands objectifs achromatiques, grâce au verre flint produit par le suisse Pierre-Louis Guinand et son fils Henri. Cauchoix sait aussi faire des montures

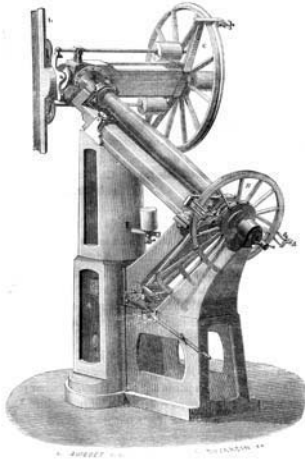


Figure 7.16. La monture parallatique de Brunner.

parallatiques pour les lunettes équatoriales, dont une avait été achetée par l'Observatoire en 1827 ; mais il est malade et meurt en 1845. Gambey devrait cependant être capable lui aussi de construire la grande monture parallatique du futur instrument, mais il meurt à son tour en 1846, et la monture (figure 7.16) est finalement confiée à l'Autrichien Johann Brunner, établi à Paris depuis 1828. Initialement, il ne s'agit que d'y placer la lunette de 19 cm de diamètre de Lerebours ; cependant :

« Cet appareil devait avoir des dimensions exagérées, afin de pouvoir se prêter, le cas arrivant, et sans nouvelles dépenses, à l'établissement d'une lunette plus grande ; ce qui alors n'était qu'en perspective est devenu une réalité. L'appareil parallatique dont le Bureau des Longitudes sollicite la construction portera immédiatement une lunette aussi grande que celle de Poulkova, qui jusqu'à présent était, avec celle de Cambridge, la plus considérable du monde.¹⁷ »

Mais où installer cette lunette ?

Ce qui semble la meilleure solution est de placer l'instrument sur la tour Est. Lorsque Arago commence vers 1839 à donner corps au projet, cette tour octogonale n'a pas de toit et est ouverte jusqu'au niveau du sol de la salle de la méridienne. Les murs ne paraissant pas à l'architecte de l'Observatoire, Henri-Alphonse de Gisors, en état de supporter l'instrument, il faut les renforcer tandis qu'une couverture doit être réalisée, sous la forme d'une coupole aplatie en maçonnerie. L'ingénieur Louis Travers et son fils, auxquels on doit le comble de fer de l'hémicycle de la Chambre des députés, sont chargés du projet, qui comprend également le support de l'instrument, la coupole et son plancher (figure 7.17). En le présentant au Ministère des travaux publics, Arago écrit¹⁸ :

« Les travaux exécutés sur le nouveau système ne peuvent manquer de réussir. Après leur achèvement, l'Observatoire de Paris possèdera quant aux dimensions et aux facilités d'observation, le plus grand établissement parallactique du monde. Cet établissement enfin n'aurait pas besoin d'être remanié, même pour des lunettes d'un mètre d'ouverture. C'est dire qu'il suffira aux besoins de la science pendant une longue suite d'années. »

Des crédits extraordinaires d'environ 118 000 francs sont votés en 1841, sans doute pour la maçonnerie, puis de 244 000 francs en 1845 et de 113 000 francs en 1846

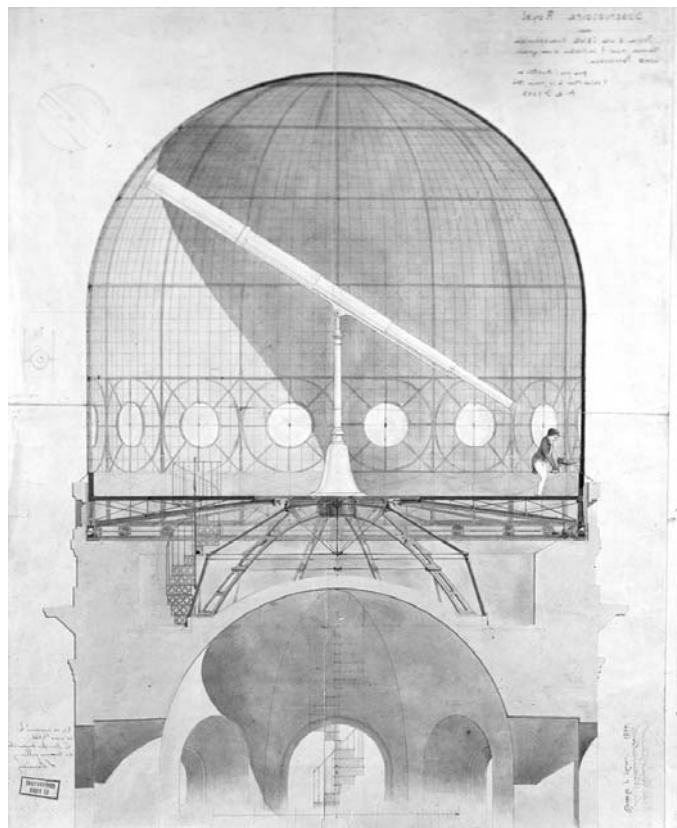
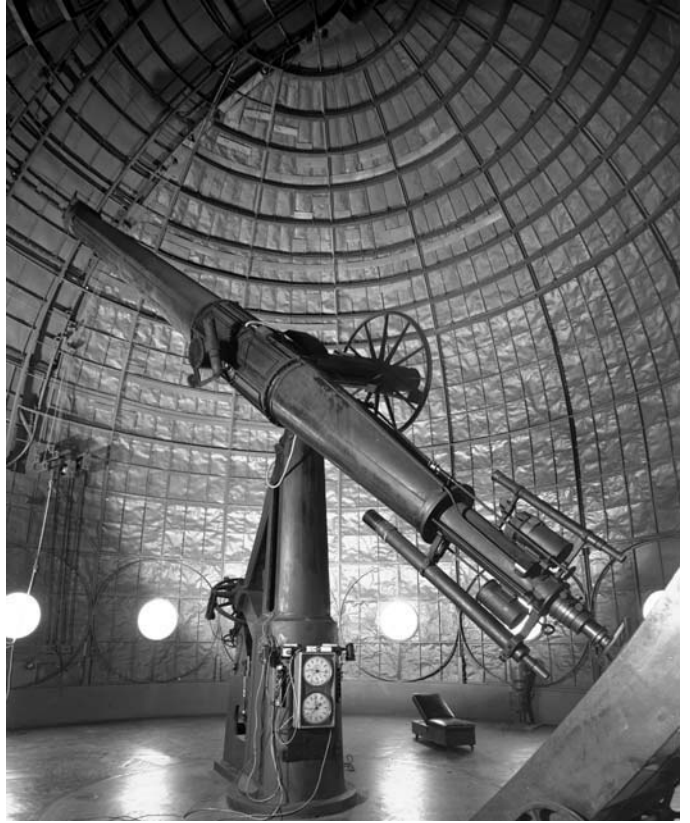


Figure 7.17. Projet de calotte hémisphérique tournante, par A. de Gisors (1846). L'araignée métallique, superbe réalisation de l'ingénieur Travers, supporte la monture centrale en ne s'appuyant que sur les murs de la tour. Le plancher tourne avec la coupole. Le dessin de la lunette est fantaisiste.

pour le reste, dont 94 000 francs pour la coupole. Tout est terminé au début de 1847 ; le ministre autorise dès l'année suivante le Bureau des longitudes à commencer la construction du grand pied parallatique, pour lequel Brunner reçoit 90 000 francs de 1851 à 1853. Ce pied et la lunette elle-même seront terminés en 1855, avec un mouvement d'entraînement de l'axe polaire réalisé par Breguet. Mais Arago est mort deux ans auparavant, sans avoir vu l'instrument fini. Les Lerebours père et fils avaient vendu en 1849 à l'Observatoire pour 40 000 francs l'objectif de 38 cm, qui avait déjà été testé à son achèvement en 1844 et trouvé excellent¹⁹.

L'instrument (figure 7.18) n'aura cependant pas le succès escompté. Il présente des défauts de conception, de même que la coupole qui l'abrite. A la suite d'une visite à l'Observatoire, Otto Struve, qui a une grande expérience d'observateur avec la lunette de Pulkovo, écrit en 1854 à

Figure 7.18. L'équatorial de Brunner dans sa coupole, aspect actuel. Le tube était à l'origine en bois ; il a été remplacé en 1884 par un tube métallique.



Le Verrier, qui vient de succéder à Arago, une lettre fort critique et parfaitement justifiée dont voici un extrait²⁰ :

« 1. La plate-forme en fer de fonte qui doit servir de base à l'équatorial repose sur des arcs de fer. Cette base est très peu solide.[...] 2. Ladite plate-forme étant supportée par des arcs en fer subira des changements rapides de position par l'effet unique de la température.[...] 3. Le diamètre de la coupole est de 12 mètres sur 10 mètres de hauteur. Par rapport à ces dimensions la fente des trappes qui [...] n'a pas un mètre de largeur est beaucoup trop étroite. L'équation [égalité] des températures intérieure et extérieure est une condition vitale pour obtenir de bonnes images.[...] 6. Le mouvement de la tour [coupole] n'est pas assez rapide. 7. Il est tout à fait inutile que le plancher sur lequel se tient l'astronome se tourne avec la coupole. 8. Il paraît un inconvénient très grave que la tour soit élevée au-dessus des autres salles d'observation et d'habitation. »

Malgré ses doutes, Le Verrier s'efforce de mener à bien l'entreprise. Mais quand on veut monter l'objectif des Lerebours en novembre 1855, on découvre que la surface du crown s'est altérée sous l'action de l'humidité de l'air, sous forme d'une multitude de petites fissures⁸ (figure 7.19). Quant à la monture équatoriale, elle n'est livrée qu'en 1859. On n'installe donc pas l'objectif, lequel, après repolissage partiel, ne servira qu'à Cornu en 1874 pour sa mesure de la vitesse de la lumière (voir le chapitre 4), puis après remontage à quelques observations. Un nouvel objectif est fabriqué en 1881 par les frères Paul et Prosper Henry, mais c'est bien tard. Entre temps, un équatorial entièrement en métal construit par Friedrich Wilhelm Eichens a été installé en 1858 sur la tour Ouest de l'Observatoire, sous une coupole cette fois satisfaisante due à Jean ; il a un objectif de 5,25 m de distance focale et de 31,6 cm de diamètre, qui pourrait être celui construit en 1834 par Lerebours père. Cet objectif est à peine plus petit que celui la lunette de la tour Est. Il sera, lui aussi, remplacé en 1884 par un autre dû à Adolphe Martin. Puis, la grande lunette de Meudon, avec ses deux objectifs, l'un pour l'observation visuelle de 83 cm de diamètre et l'autre, de 62 cm, pour la photographie, allait être mise en service en 1896²¹.



Figure 7.19. L'objectif de 38 cm de diamètre construit par Lerebours père et fils pour l'équatorial de Brunner. L'aspect terne de la surface est dû aux microfissures qui affectent le crown.

L'équatorial de Brunner existe toujours à l'Observatoire, avec quelques modifications de l'instrument et de la coupole (figure 7.18) ; il a été utilisé par différents astronomes dont un amateur assidu, Paul Baize, pour observer des étoiles doubles et les satellites des planètes. La coupole de la tour Ouest a été transportée en 1974 à Saint-Véran (Hautes-Alpes), dans un petit observatoire qui n'est plus utilisé que par des amateurs. Elle y abrite maintenant un télescope de 60 cm, l'équatorial d'Eichens ayant disparu.

L'examen de ce parc instrumental nous amène à quelques remarques. L'astronomie de position est bien servie, ce qui est normal pour l'époque. Le Bureau des longitudes, sans doute échaudé par l'échec du grand télescope de Passy qui avait été installé à l'Observatoire pendant la Révolution, a délibérément opté en faveur des lunettes. Pourtant, on connaissait parfaitement les magnifiques résultats que William Herschel avait obtenu avec ses télescopes géants, et lors de sa création en 1795 le Bureau des

⁸ Ce défaut du crown devait être corrigé par Georges Bontemps à la verrerie de Choisy-le-Roi, en changeant la composition.

longitudes avait envisagé la construction d'un télescope de près de deux mètres de diamètre. De surcroît, les lunettes sont seulement destinées à observer les planètes et leurs satellites, les comètes et les étoiles doubles, et à mesurer les parallaxes stellaires ; un programme certes important, mais on n'observera que de temps en temps les amas stellaires et les nébuleuses. Ce désintérêt est un peu surprenant de la part d'Arago, dont on aurait pu penser qu'il avait l'esprit plus ouvert : mais le Bureau des longitudes ne lui laissait pas les mains entièrement libres. L'astronomie française a de nouveau manqué le coche jusqu'au milieu du xx^e siècle : bien que Foucault ait construit en 1864 pour l'Observatoire de Marseille le premier télescope moderne important, dont le miroir de verre a 80 cm de diamètre, et qu'un autre semblable ait été placé peu après à l'Observatoire de Toulouse, suivi en 1893 d'un télescope de 1 m à Meudon, on en est resté là jusqu'à l'installation des télescopes de 1,20 m puis de 1,93 m de diamètre à l'Observatoire de Haute-Provence, créé en 1936. Il est vrai qu'un télescope de 1,20 m construit pour l'Observatoire de Paris avait été un échec, qui rappelle celui du télescope de Passy ; mais on avait installé à grands frais la grande lunette à Meudon. Pendant ce temps, on inaugurait en 1917 aux États-Unis le télescope de 2,50 m de diamètre du Mont Wilson, qui devait permettre à Edwin Hubble de déterminer la distance et le décalage en longueurs d'onde du spectre des galaxies et de découvrir en 1927-1929 avec Georges Lemaître l'expansion de l'Univers.

L'amphithéâtre

Une des attributions du Bureau des longitudes était de donner un cours public d'astronomie destiné à « *former des jeunes gens, soit pour remplir les places des directeurs des observatoires des différents départements, soit pour fournir des astronomes dans les expéditions lointaines* »²². En effet, les observatoires de province avaient subi bien plus d'outrages à la Révolution que celui de Paris, et ce sera un souci constant de la part du Bureau des longitudes de les fournir en astronomes et en instruments, à vrai dire généralement des instruments déclassés provenant de Paris. Arago est chargé en 1812 d'assurer ce cours et débute en 1813. Malgré son but initialement modeste, l'enseignement d'Arago est d'une telle qualité et donné avec un tel enthousiasme que le public s'y presse. Il donne d'abord

le cours à l'Observatoire, dans la grande salle de la méridienne dont l'acoustique est déplorable, puis au Collège de France. Mais il faut un lieu d'accueil à la taille de ce succès.

En novembre 1836, Arago transmet au ministre de l'intérieur un projet d'amphithéâtre dans l'aile Ouest de l'Observatoire, projet qui est accepté avec l'attribution d'une subvention exceptionnelle de 120 000 francs en 1839 puis d'une somme égale en 1840. L'amphithéâtre, œuvre de l'architecte de l'Observatoire A. de Gisors, est achevé en février 1841 (figure 7.20). « *Spacieux, élégant et commode* » selon un compte rendu de l'époque, « *d'un luxe scandaleux* », dit avec humour Arago²³, il peut accueillir 800 auditeurs (figure 7.21). Arago et le Bureau des longitudes en suivent avec soin la décoration : une statue de Laplace due à Gabriel Joseph Garraud y fait pendant à celle de Cassini I terminée en 1810 par Jean-Guillaume Moitte^h, et il est orné des bustes de Newton, de d'Alembert et de Lagrange. Cinq médaillons renferment les portraits de Clairaut, de Picard, de La Caille, de Delambre et de Bouguer. Le plafond reçoit une carte de la Lune, le tableau noir est surmonté d'un fronton allégorique (figure 7.22) et six médaillons des lambris représentent les principaux instruments d'astronomie et de marine. Le tableau noir et quatre de ces médaillons subsistent à l'Observatoire (figure 7.23 et 7.24).

Arago fera cours dans cet amphithéâtre jusqu'en 1846. Après sa mort, Le Verrier, qui lui succède à la direction de l'Observatoire, s'empresse de le faire détruire pour installer ses appartements à la place. Il est miraculeux que certains éléments de sa décoration aient survécu. La statue de Laplace figure aujourd'hui en face de celle de Jean-Dominique Cassini dans la galerie de l'Observatoire, mais les bustes et les portraits ont disparu de l'Observatoire.

^h Cette statue se trouvait auparavant dans la salle de la méridienne, où l'on voyait aussi les bustes de Lalande, Lagrange et Delambre.

Figure 7.20. Coupe de l'amphithéâtre d'Arago, projet de l'architecte A. de Gisors (1837).

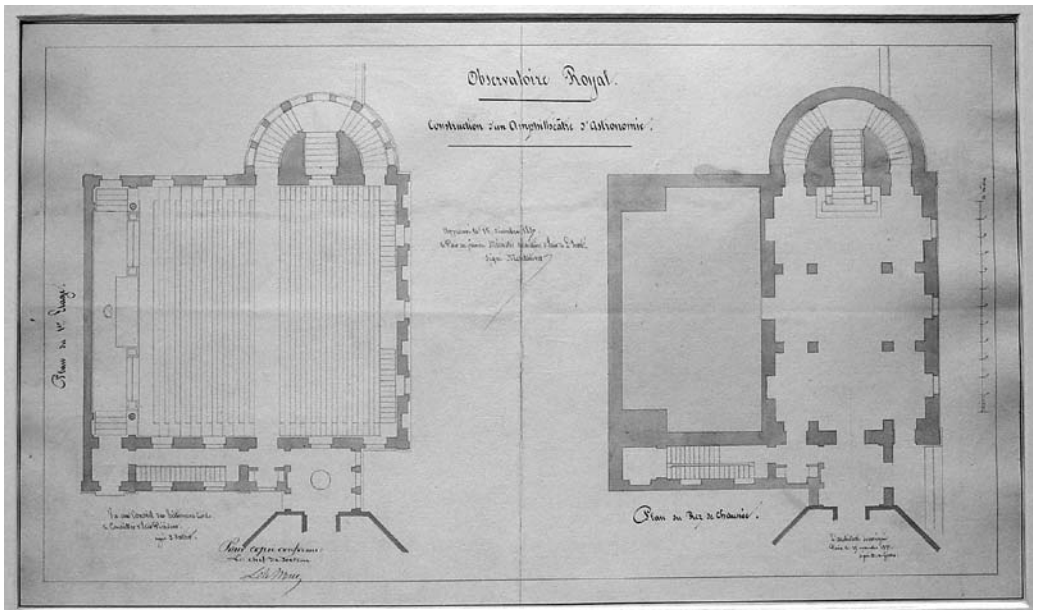
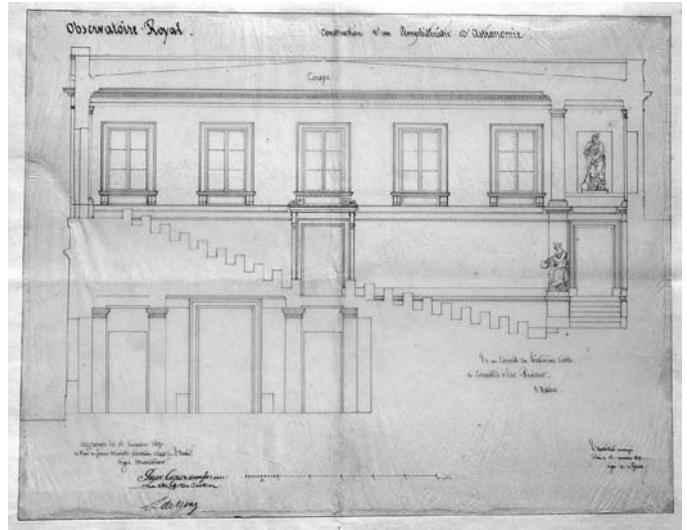


Figure 7.21. Plan de l'amphithéâtre d'Arago, projet de l'architecte A. de Gisors (1837).
À droite, le rez-de-chaussée avec au fond l'escalier d'accès du public à l'amphithéâtre.
À gauche, l'amphithéâtre.

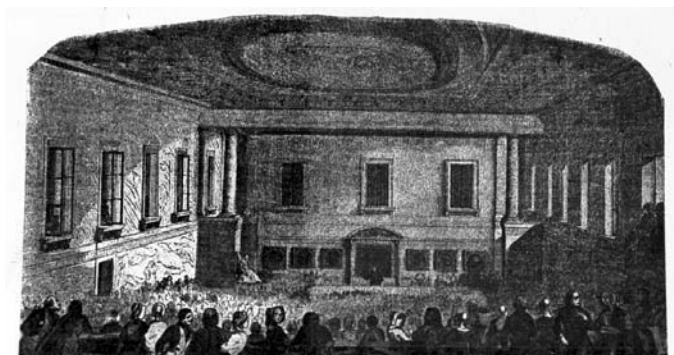
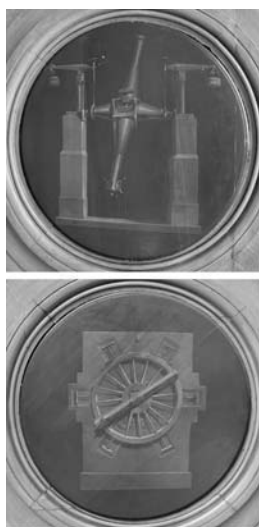


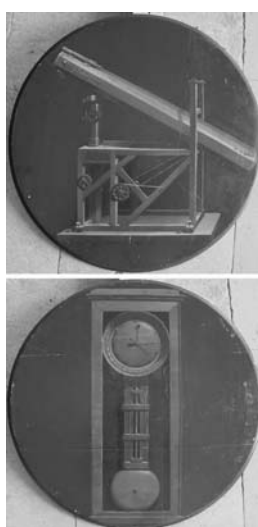
Figure 7.22. L'amphithéâtre d'Arago, d'après une gravure contemporaine. On peut voir le tableau noir avec son fronton sculpté, les six médaillons des lambris de part et d'autre, et sur les côtés les statues de Cassini I et de Laplace.



Figure 7.23. Le fronton du tableau noir d'Arago, récemment restauré. On peut voir l'emplacement du tableau sur la gravure de la figure 7.22.



a



b

Figure 7.24 a et b. Les quatre médaillons subsistants de l'amphithéâtre d'Arago (voir leur emplacement sur la figure 7.22). Ils représentent de haut en bas la lunette des passages de Gambey, le cercle mural de Gambey (a), puis un télescope semblable à ceux de William Herschel et une horloge astronomique (b). Herschel avait commercialisé des télescopes de 7 pieds de long dont plusieurs exemplaires — ou des copies comme le télescope à miroir de platine de Carroché — se trouvaient à Paris ; on peut voir des instruments de ce type au *Science Museum* de Londres ou au musée Teyler de Haarlem.

La vie à l'Observatoire

Les astronomes et le clan Arago

Le personnel scientifique de l'Observatoire nous est très bien connu grâce aux registres et aux publications du Bureau des longitudes. À l'exception des anciens navigateurs, des géographes et dans une certaine mesure des artistes, tous ses membres s'occupent d'astronomie ou de géodésie, qui fait jusqu'aux années 1820 partie intégrante de l'astronomie. La figure 1.5 donne la liste du personnel scientifique du Bureau des longitudes, de ses origines à la mort d'Arago. On y remarque, à côté de noms prestigieux, d'autres qui sont généralement inconnus aujourd'hui. Et pourtant, l'un de ces derniers avait une certaine stature scientifique : Alexis Bouvard.

Les astronomes résident autant que possible à l'Observatoire, soit dans des constructions séparées qui disparaissent vers 1815, soit à l'intérieur même du bâtiment de Claude Perrault où l'on a trouvé pratique d'aménager des appartements, les observations se faisant à l'extérieur ou dans des constructions annexes. C'est ainsi que dès sa nomination comme secrétaire-bibliothécaire en 1805, Arago s'installe dans une petite maison dans l'enceinte de l'Observatoire, qui vient d'être libérée par Bouvard. En 1810, Humboldt vient l'y rejoindre temporairement, mais après son mariage le 11 septembre 1811 Arago s'installe avec son épouse dans le bâtiment principal. Il y restera toute sa vie (figure 2.9) ; c'est là que sont nés ses trois fils, et qu'est morte sa femme en 1829.

En 1820, la famille Arago ayant subi un revers de fortune après la mort du père de François et la révocation pour raisons politiques de son frère Jean, qui a succédé à son père comme caissier de la Monnaie de Perpignan, Arago accueille à l'Observatoire un autre frère, Étienne, et sa sœur Marguerite. Étienne n'y restera pas longtemps. Quant à Marguerite, elle va bientôt épouser Claude-Louis Mathieu (figure 7.25 ; encadré 7.2), de trois ans l'aîné de François Arago, qui réside à l'Observatoire. C'est une des quatre alliances qui consolideront ce que l'on a quelquefois appelé « *le clan Arago* », lequel comprend aussi Humboldt et Félix Savary, grand ami d'Arago qui ira se soigner puis mourir à Estagel en 1841, dans la maison de la mère de ce dernier. Voici les trois autres :

- la sœur de la femme de François épouse le physicien Alexis Petit ;
- la fille de Claude-Louis et de Marguerite Mathieu, Lucie, née en 1823, épouse en 1843 Ernest Laugier, disciple de Savary, élève astronome à l'Observatoire depuis 1834 (figure 7.26, encadré 7.3) ;
- la sœur d'Ernest Laugier, Adèle, épouse en 1840 Jacques Babinet, polytechnicien, élu membre de l'Académie des sciences la même année, qui sera nommé adjoint au Bureau des longitudes en 1841.

Les membres de l'entourage immédiat d'Arago partagent ses convictions politiques, qui sont devenues progressivement républicaines jusqu'à l'apogée de 1848. Mathieu est élu à plusieurs reprises député de Saône-et-Loire, son département natal, d'abord contre son concitoyen Alphonse de Lamartine puis sur une liste commune avec lui en avril 1848. Quant à Étienne Arago, il est au premier rang sur les barricades en 1830 et en 1848, puis mène une carrière politique active et mouvementée, tandis qu'Emmanuel, fils de l'astronome, est préfet et ambassadeur en 1848. Il n'est pas étonnant que beaucoup de contemporains, au premier rang desquels le chimiste et homme politique François Raspail, aient pris ombrage de cette famille quelque peu envahissante.

Encadré 7.2. Claude-Louis Mathieu

Né à Macon en 1783 dans une famille modeste, Mathieu est aidé financièrement dans ses études par Delambre, qui lui procure une chambre à l'Observatoire en 1801. Il entre à l'École polytechnique en 1803 et se destine à la carrière des Ponts et Chaussées, qu'il abandonne en 1806 pour prendre en 1807, toujours grâce à Delambre, la place de « *secrétaire-assistant* » (précédemment secrétaire-bibliothécaire) au Bureau des longitudes, en remplacement d'Arago, parti mesurer le méridien aux Baléares. Il est nommé adjoint en 1817, entre à l'Académie des sciences et supplée Delambre au Collège de France. Il devient aussi « *Inspecteur extraordinaire du cadastre* ». Homme discret et érudit « *qui, au rebours de tant d'autres, faisait du travail et pas de bruit*²⁴ », travailleur infatigable, il prend



Figure 7.25. Claude-Louis Mathieu (1783-1875).

une grande part à la rédaction de la *Connaissance des temps* et de l'*Annuaire du Bureau des longitudes*. Sa carrière scientifique et politique se déroule quelque peu dans l'ombre d'Arago bien qu'il ait trois ans de plus. Il lui survivra 22 ans.

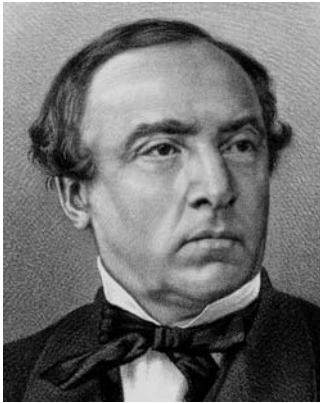


Figure 7.26. Ernest Laugier (1812-1872).

Encadré 7.3. Ernest Laugier et son épouse Lucie

Contrairement à Mathieu, Laugier est issu d'une famille illustre de juristes et de scientifiques. Après des études à l'École polytechnique, il entre à l'Observatoire en 1834, puis à l'Académie des sciences en 1843. Il aide beaucoup Arago en réalisant les observations et les expériences que ce dernier ne peut faire en raison de sa vue déficiente. Ses travaux personnels portent surtout sur les taches solaires et la rotation du Soleil.

Son épouse Lucie, fille de Claude-Louis Mathieu et de Marguerite Arago, n'a pas de formation scientifique, mais elle est intelligente et ouverte. C'est la personnalité dominante de la famille, « *ange de l'Observatoire* » d'après Humboldt au milieu d'un père et d'un mari plutôt austères et de son oncle François qui « passait des plus violentes tempêtes aux plus séduisantes sérénités, et [qui] ne savait pas toujours épargner les bourrasques à sa famille »²⁵. Elle sera pourtant son ange gardien à la fin de sa vie, et une légende peu fondée prétend qu'Arago lui a dicté l'*Astronomie populaire* (voir le chapitre 11). Elle conservera ses instruments, qu'elle donnera à l'Observatoire.

Les visiteurs

L'Observatoire étant un des principaux centres de la vie scientifique parisienne, il n'est pas étonnant qu'il ait reçu la visite d'hôtes de marque. Nous n'en citerons que deux : le roi de Prusse et Victor Hugo.

Peu après la chute de l'Empire, les hauts personnages étrangers étaient nombreux à vouloir visiter l'Observatoire, mais les astronomes, dont Arago, étaient

réticents à les recevoir. Cependant Humboldt, voulant y introduire son souverain le roi de Prusse Frédéric-Guillaume III, le fit se déguiser en simple touriste. Arago raconte lui-même cette visite, non sans quelque auto-satisfaction²⁶ :

« Pendant la visite aux instruments,[...] la politique se mêle à la conversation et Arago ne dissimule pas son opinion sur la façon dont les souverains étrangers ont fait payer à la France les folies ambitieuses de Napoléon. Humboldt commençant à être inquiet tire à part Arago, pendant que le deuxième visiteur regardait dans un télescope : « Modère-toi, lui dit-il, c'est le Roi ! – Je m'en doutais bien, répondit Arago, en souriant – c'est pour cela que j'ai exprimé si nettement mon opinion ». [...] Une lettre de Humboldt vint apprendre quelques jours après à son ami, que le Roi de Prusse n'avait pas mal pris la chose, qu'il avait approuvé même les réflexions patriotiques du savant français. »

L'autre visite date de 1834. Victor Hugo vient observer la Lune à l'Observatoire, sous la conduite d'Arago qui est juste nommé Directeur des observations. Très impressionné par cette visite, Hugo en fait en 1863, alors qu'il est à Guernesey, un compte rendu assez exact bien que très romantique²⁷, dont nous reproduisons les principaux extraits « astronomiques » dans l'encadré 7.4. Le titre de ce texte peu connu vient du nom d'une des structures de la Lune que Victor Hugo prétend avoir vues, le *Promontorium Somnii* (Promontoire des Songes). Il décrit d'abord l'observation, puis entreprend une réflexion philosophique sur les rêves et les mythes, longue et très érudite. Malgré sa mémoire exceptionnelle, Hugo ne pouvait pas se souvenir après deux décennies des détails de ce qu'il avait observé. Les noms de ces structures qu'il a observées sont donnés dans son texte non pas dans l'ordre de leur apparition dans la lunette, mais dans l'ordre de la nomenclature de la carte de la Lune de Cassini I : cette carte, reproduite dans le *Magasin pittoresque* du 23 mars 1833, était collée sur un folio du manuscrit du *Promontorium Somnii*. Il décrit comme rapides, presque fulgurants, des phénomènes en réalité assez lents.

Comme l'ont montré deux astronomes de l'Observatoire, Suzanne Débarbat et Michel Combes²⁸, le fort grossissement de 400 de la lunette utilisée dans cette observation et son faible champ excluent qu'il se soit agi de celle du cercle de Reichenbach ou de celle de l'équatorial

de Gambey, qui n'en était d'ailleurs qu'aux essais. Il s'agissait sans doute d'un des objectifs de Cauchoix ou de Lerebours en dépôt à l'Observatoire, peut-être placé sur la monture parallatique de Cauchoix qui avait été achetée en 1827. L'observation en effet a été assez longue pour que diverses montagnes et cratères lunaires aient le temps d'être progressivement éclairés par le Soleil, et a donc nécessité que le mouvement apparent de la Lune soit bien suivi par la lunette.

Encadré 7.4. Extraits du *Promontorium Somnii* de Victor Hugo

« Je me rappelle qu'un soir d'été, il y a longtemps de cela, en 1834, j'allai à l'Observatoire. Je parle de Paris, où j'étais alors. J'entrai. La nuit était claire, l'air pur, le ciel serein, la lune à son croissant ; on distinguait à l'œil nu la rondeur obscure modelée, la lueur [lumière] cendrée. Arago était chez lui, il me fit monter sur la plate-forme. Il y avait là une lunette qui grossissait quatre cents fois [...]. Arago disposa la lunette, et me dit : regardez.

Je regardai. [...]

- Je ne vois rien, dis-je.

Arago répondit : - Vous voyez la lune.

J'insistai : - je ne vois rien.

Arago reprit : - Regardez.

Un instant après, Arago poursuivit : - Vous venez de faire un voyage.

Quel voyage ?

Tout à l'heure, comme tous les habitants de la terre, vous étiez à quatre-vingt-dix mille lieues de la Lune.

Eh bien ?

Vous en êtes maintenant à deux cent vingt-cinq lieues.

[...] C'était là, en effet, le résultat du grossissement de quatre cents fois.[...] Le champ du télescope [sic] était trop étroit pour embrasser la planète [sic] entière, la sphère ne s'y dessinait pas, et ce que je voyais, si j'en voyais quelque chose, n'était qu'un segment obscur. Arago, comme il me l'expliqua ensuite, avait dirigé le télescope vers un point de la lune qui n'était pas encore éclairé. Je repris :

- Je ne vois rien.

- Regardez, dit Arago.

Je suivis l'exemple de Dante vis-à-vis de Virgile. J'obéis.

Peu à peu, ma rétine fit ce qu'elle avait à faire,[...] ma pupille se dilata, mon œil s'habitua, comme on dit, et cette noirceur que je regardais commença à blêmir. Je distinguai, quoi ? Impossible de le dire.[...] Cette impression, c'est l'inexplicable. Qui ne l'a pas éprouvée ne saurait s'en rendre compte. [...]

Tout à coup j'eus un soubresaut, un éclair flamboya, ce fut merveilleux et formidable, je fermai les yeux d'éblouissement. Je venais de voir le soleil se lever dans la lune.

L'éclair fit une rencontre, quelque chose comme une cime peut-être, une sorte de serpent de feu se dessina dans cette noirceur, se roula en cercle et resta immobile ; c'était un cratère qui apparaissait. A quelque distance, un autre éclair, une autre coulure de lumière, un autre cercle ; deuxième cratère. Le premier est le volcan Messala, me dit Arago ; le deuxième est le Promontorium Somnii. Puis successivement resplendirent, comme les couronnes de flamme que porte l'ombre, comme les margelles de braise des puits de l'abîme, le mont Proclus, le mont Cléomèdes, le mont Petavius, ces vésuves et ces etnas de là-haut ; puis une pourpre tumultueuse courut au plus noir de ce prodigieux horizon, une dentelure de charbons ardents se hérissa, et se fixa, ne remuant plus, terrible. C'est une chaîne d'Alpes lunaires, me dit Arago. Cependant les cercles grandissaient, s'élargissaient, se mêlaient par les bords, s'exagéraient jusqu'à se confondre tous ensemble ; des vallées se creusaient, des précipices s'ouvraient, des hiatus écartaient leurs lèvres que débordait une écume d'ombre, des spirales profondes s'enfonçaient, descentes effrayantes pour le regard, d'immenses cônes d'obscurité se projetaient, les ombres remuaient, des bandes de rayons se posaient comme des architraves d'un piton à l'autre, des nœuds de cratères faisaient des froncements autour des pics, toutes sortes de profils de fournaise surgissaient pêle-mêle, les uns fumée, les autres clarté ; des caps, des promontoires, des gorges, des cols, des plateaux, de vastes plans inclinés, des escarpements, des coupures, s'enchevêtraient mêlant leurs courbes et leurs angles ; on voyait la figure des montagnes. Cela existait magnifiquement.[...] On eut dit que l'aurore avait brusquement mis le feu à ce monde de ténèbres.

Arago m'expliqua, ce qui du reste se comprenait de soi-même, que, tandis que je regardais, le mouvement propre de la lune avait tourné peu à peu vers le soleil la lisière de la partie obscure, de sorte qu'à un moment donné le jour y avait fait son entrée.

Cette vision est un de mes profonds souvenirs.[...] »

Les observations

Du temps d'Arago, toutes les observations se font sur place. Il n'est pas question, comme aujourd'hui où l'on n'observe plus dans les observatoires situés en ville, de se rendre dans des endroits éloignés comme l'île d'Hawaï ou le nord du Chili pour bénéficier des meilleures conditions possibles. Seuls les passages de Vénus devant le Soleil justifient des expéditions lointaines, mais il n'y en a aucun du vivant d'Arago. Les éclipses totales de Soleil fournissent des occasions de voyage : quelquefois, des astronomes se rendent dans la zone de totalité. C'est le cas d'Arago, de Laugier et de Mauvais pour celle du 8 juillet 1842 : le Soleil est totalement éclipsé à Perpignan, et Arago voit là une bonne occasion de visiter sa famille et sa circonscription. Frédéric Petit se rend à Montpellier et Eugène Bouvard à Digne. Du côté Anglais, Airy va observer à Pavie. Pour la première fois, l'expédition prend un tour vraiment scientifique, car Arago l'a bien préparée en donnant des conseils sur ce qu'il fallait observer²⁹. Nos astronomes se munissent chacun d'une lunette et font des observations intéressantes des protubérances et de la couronne solaire³⁰. Cependant, les premières expéditions importantes comportant une longue préparation n'auront lieu qu'à l'occasion de l'éclipse totale du 18 juillet 1860 en Espagne³¹.

Pour le reste, l'astronomie est une longue routine. Il faut mesurer toutes les nuits à la lunette méridienne l'instant du passage des étoiles brillantes et des planètes au méridien, pour déterminer l'heure et l'ascension droite des planètes (figure 7.2 et figure 7.3). Avec les quarts de cercle ou les cercles méridiens entiers, on mesure chaque nuit la distance angulaire au zénith des étoiles et des planètes, obtenant ainsi leur déclinaison connaissant la latitude de l'instrument. Par ailleurs, on continue à observer le plus régulièrement possible le moment où se produisent les éclipses des satellites de Jupiter derrière cette planète, afin d'établir leur éphéméride en utilisant la théorie de Laplace ; on se sert pour cela des diverses lunettes ou télescopes disponibles à l'Observatoire. L'observation de l'instant de l'occultation d'étoiles par la Lune permet d'avoir une position très précise de notre satellite, que l'on peut comparer avec la prévision de la théorie ; mais il faut connaître précisément la position de ces étoiles, ce qui n'est possible qu'après la mise en service en 1811 du cercle de Reichenbach.

Dès août 1800, date à laquelle elles reprennent après la tourmente révolutionnaire, le principal acteur de ces observations est Bouvard. À partir du 22 mars 1805, elles sont faites en commun par Bouvard et « *M. Arago, secrétaire de l'observatoire* ». Puis Mathieu, « *qui s'est beaucoup exercé* », remplace Arago pendant son voyage aux Baléares. Arago recommence à observer à l'équinoxe d'automne 1809, peu après son retour. Nicolle se joint aux trois observateurs à partir de 1815, et Adolphe Gambart participe aux observations en 1818 et 1819. Lorsqu'Arago devient Directeur des observations en 1834, Bouvard n'observe plus et Nicolle a dû démissionner en 1830 ; les observations sont alors faites principalement par les élèves astronomes et Arago ne fait plus d'observations de routine.

Les observations brutes faites jusqu'à la fin de 1809 sont publiées chaque année dans la *Connaissance des temps*, qui insère aussi à l'occasion des observations jugées intéressantes faites à l'étranger. Elles sont aussi rassemblées en un volume spécial³². Ensuite, les observations ne font plus l'objet que de gros volumes publiés occasionnellement³³. Aucun effort n'est fait pour dépouiller ces observations en publiant, par exemple, l'ascension droite et la déclinaison des planètes : c'est aux astronomes intéressés, comme Bouvard et plus tard Le Verrier, lequel a réduit avec son Bureau de calculs toutes les observations publiées ou non entre 1800 et 1854, de se livrer à ce travail pénibleⁱ.

Lorsque l'équatorial de Gambey devient disponible, on s'en sert pour mesurer la position des comètes par rapport à celle des étoiles brillantes proches. Avec bien du retard par rapport à ce que Wilhelm Struve et John Herschel faisaient depuis longtemps, Antoine Yvon Villarceau l'utilise à partir de 1849 avec d'autres instruments pour séparer les étoiles doubles et observer le cas échéant leur mouvement l'une autour de l'autre en comparant des observations réparties sur plusieurs années.

ⁱ On trouve dans l'avertissement qui précède les observations de 1837 à 1846 la phrase suivante : « *Il aurait fallu ajouter au personnel de l'Observatoire deux collaborateurs : à moins que l'on n'eût voulu imposer ce nouveau travail aux personnes qui, aujourd'hui, sont chargées des observations. En transformant ces jeunes gens distingués en machines à calculer, on aurait complètement changé leur situation, on les eût empêchés de se livrer à de nouvelles recherches. [...] Au demeurant, la question est réservée et sera résolue lorsque les circonstances le permettront.* » Elles ne l'ont jamais permis du vivant d'Arago.

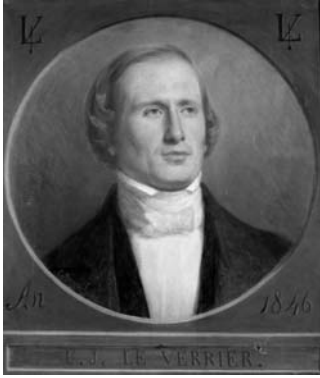


Figure 7.27. Urbain-Jean-Joseph Le Verrier (1811-1877).

On observe aussi des nébuleuses dans l'espoir de détecter leur déplacement éventuel par rapport aux étoiles, afin d'obtenir une idée de leur distance : c'est ce à quoi s'attache en vain Laugier. Les observations réussies de la parallaxe de 61 Cygni par Bessel en 1838, que nous détaillerons au chapitre suivant, suscitent un grand intérêt et Faye essaie sans succès de mesurer celle d'autres étoiles. On observe aussi le Soleil et ses taches, qui sont le domaine de Laugier. D'autres observations sont en quelque sorte l'apanage d'Arago : celles du diamètre et de l'aplatissement des planètes. Aucune de ces observations n'aura un grand retentissement, surtout parce que les instruments disponibles ne font pas le poids vis-à-vis de ce qui existe en Allemagne, en Angleterre, en Russie et aux États-Unis. C'est pourquoi Arago demandera avec tant d'insistance la construction d'une grande lunette équatoriale.

L'affaire Le Verrier³⁴

Sorti de l'École polytechnique en 1833 comme ingénieur des tabacs, Urbain-Jean-Joseph Le Verrier (figure 7.27) se destine à la chimie. Il travaille au laboratoire de Gay-Lussac et postule en 1837 la place de répétiteur de chimie à Polytechnique, mais c'est Victor Regnault qui l'obtient. On lui offre en revanche une place de répétiteur de géodésie, astronomie et machines, qu'il accepte. Cela lui donne l'occasion de rencontrer Arago. Le Verrier va désormais se spécialiser en mécanique céleste. Il présente à l'Académie des sciences le 16 septembre 1839 un *Mémoire sur les variations séculaires des éléments des orbites, pour les sept planètes principales, Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne et Uranus*³⁵. Il sait qu'il y a des anomalies dans le mouvement de la planète Uranus, anomalies qu'avait déjà constatées Delambre et Bouvard, et qu'ils avaient en vain essayé d'expliquer. C'est désastreux pour la mécanique newtonienne, le grand article de foi de la science à l'époque ! En publiant en 1821 ses *Tables d'Uranus*, Bouvard avait cependant suggéré qu'une planète inconnue pourrait bien perturber le mouvement d'Uranus. Mais il faut reprendre le travail en analysant non seulement les observations d'Uranus depuis sa découverte par Herschel en 1781, mais aussi des observations plus anciennes faites par hasard par divers observateurs qui n'avaient pas reconnu que l'objet dont ils avaient mesuré la position était une nouvelle planète. C'est ce à quoi s'attelle

Le Verrier, qui étudie à fond l'influence perturbatrice des planètes connues sur Uranus : en 1842, il publie dans les *Comptes rendus* un article où il montre que, toutes les corrections correspondant à ces perturbations étant faites, l'erreur sur la position de cette planète par rapport aux prédictions de ses éphémérides avait atteint 70 secondes de degré en 1838³⁶. Un autre jeune astronome, Charles Delaunay (figure 7.28), étudie de son côté, sous la supervision de Liouville, certaines perturbations d'Uranus³⁷. Une controverse éclate à ce sujet entre Le Verrier et lui, qui deviendront des ennemis mortels³⁸.

Le temps était mûr pour tenter de résoudre définitivement le problème du mouvement d'Uranus. Le neveu d'Alexis Bouvard, Eugène Bouvard, établit de nouvelles tables de la planète et remarque³⁹ :

« Les discordances entre les observations et la théorie me portent à croire qu'il y a beaucoup de vraisemblance dans l'idée émise par mon oncle sur l'existence d'une autre planète troublant Uranus, »

ce qui confirme que c'est bien Alexis Bouvard qui a eu l'idée de cette « planète troublante », idée qui va se répandre dans le monde scientifique et le grand public. Mais Arago n'a pas grande confiance en Eugène Bouvard, qui avait fait de mauvaises mesures lors de son expédition à Digne pour observer l'éclipse totale de Soleil de 1842. Il charge donc Le Verrier de s'occuper du problème. Dans le grand article de 1846 où Le Verrier résume ses recherches sur Uranus et sa découverte de Neptune⁴⁰, il écrit :

« Dans le courant de l'été de l'année 1845, M. Arago voulut bien me représenter que l'importance de cette question imposait à chaque astronome le devoir de concourir, autant qu'il était en lui, à l'éclaircir. J'abandonnai donc momentanément, pour m'occuper d'Uranus, les recherches que j'avais entreprises sur les comètes. Telle est l'origine du travail actuel. Je désire vivement avoir répondu d'une manière satisfaisante à l'appel de l'illustre savant dont l'amitié m'a si puissamment encouragé dans ces longues et pénibles recherches. »

Le 1^{er} juin 1846, Le Verrier, qui vient d'être élu à l'Académie des sciences et nommé Astronome adjoint au Bureau des longitudes, annonce à l'Académie qu'il a reconnu l'existence de la planète troublante. Le 31 août, il prédit sa position dans le ciel. On connaît la suite : Le Verrier écrit à son collègue Johann Gottfried Galle à



Figure 7.28. Charles Delaunay (1816-1872).

Berlin, et le soir même où il reçoit la lettre, le 23 septembre, Galle aidé de Heinrich Louis d'Arrest découvre la nouvelle planète à moins d'un degré de la position prédite. Cette découverte est triomphalement annoncée par Arago à l'Académie le 5 octobre⁴¹ :

« M. Arago donne lecture d'une Lettre de M. Galle, de Berlin, à M. Le Verrier, en date du 25 septembre. Les premières lignes de cette Lettre sont ainsi conçues : « La planète dont vous avez signalé la position existe réellement⁴².[...] » M. Arago a trouvé dans la Lettre de l'observateur de Berlin, l'occasion de tracer avec détail l'histoire de la mémorable découverte de M. Le Verrier. « M. Le Verrier a aperçu le nouvel astre sans avoir besoin de jeter un seul regard vers le ciel ; il l'a vu au bout de sa plume.[...] Il était [...] indispensable de procéder à l'exécution de cartes nouvelles, et embrassant jusqu'aux étoiles de dixième grandeur, avant de se livrer, avec des chances assurées de réussite, à la recherche du nouvel astre. Tel était, pour l'espace très-circonscrit en dehors duquel, suivant M. Le Verrier, la planète ne pouvait pas se trouver, le travail minutieux qu'on dût commencer à Paris^j. A Berlin, ce soin devint superflu : on y possédait déjà des cartes détaillées du ciel. Par une heureuse coïncidence, la carte de la 21^e Heure, la carte de la région où se meut maintenant la nouvelle planète, venait d'être gravée et publiée^k. » M. Arago a annoncé à l'Académie qu'ayant reçu de M. Le Verrier une délégation très-flatteuse : le droit de nommer la planète nouvelle, il s'est décidé à la désigner par le nom de celui qui l'a si savamment découverte, à l'appeler Le Verrier.[...]

« Se préoccupe-t-on de quelques réformes que ma résolution semblerait entraîner ? Eh bien, qu'à cela ne tienne. Herschel détrônera Uranus ; le nom d'Olbers se substituera à celui de Junon, etc. ; il n'est jamais trop tard pour mettre en lambeaux les langes de la routine !

Je prends l'engagement, a dit en terminant M. Arago, de ne jamais appeler la nouvelle planète, que du nom de Planète de Le Verrier. Je croirai donner ainsi une preuve irrécusable de mon amour des sciences, et suivre les inspirations d'un légitime sentiment de nationalité. »

^j Une recherche de la planète a été entreprise à Paris à l'instigation d'Arago, mais sans résultat : voir Danjon (1946).

^k Aucune carte du ciel détaillée avec de bonnes positions des étoiles n'existait à Paris.

Arago va défendre la découverte de Le Verrier contre les réclamations d'Airy, de James Challis, le directeur de l'Observatoire de Cambridge, et de John Herschel, en faveur de leur compatriote John Couch Adams⁴³. L'histoire de cette controverse est presque aussi connue que celle de la découverte elle-même. Une étude récente⁴⁴ a montré, en accord avec Arago, qu'Adams « *ne mérite pas la même reconnaissance que Le Verrier* ».

Bien qu'Arago soit généralement plein d'enthousiasme, on peut s'étonner du tour exagérément dithyrambique de ses interventions à l'Académie à propos de la découverte de la « *planète Le Verrier* ». Dans une lettre écrite en 1869 au Ministre de l'Instruction publique pour protester contre les exactions de Le Verrier, Delaunay écrit⁴⁵ :

« *En 1846, lors de la découverte de la planète Neptune, M. Arago, poussé par des circonstances hideuses dont il ne convient pas de soulever le voile ici, a élevé M. Le Verrier sur le pavois, et en a fait un homme extraordinaire, un des plus grands génies que la France ait produits. Quelques mois plus tard, M. Arago s'est aperçu de la faute énorme qu'il avait commise, mais le mal était fait et il ne dépendait plus de lui de le réparer ; ses dernières années ont été empoisonnées par la prévision des funestes conséquences qui devaient inévitablement en résulter.* »

Quelles sont ces « *circonstances hideuses* » ? Une rumeur persistante prétend qu'Arago aurait eu une liaison avec Madame le Verrier. Le Verrier l'ayant découvert, il en aurait profité pour organiser un chantage. Cette hypothèse est plausible, mais difficilement vérifiable.

Bien entendu, la découverte de Le Verrier suscite l'enthousiasme du monde savant, mais aussi du grand public. Mais il y a des jaloux ! Laugier et Mauvais attaquent Le Verrier sur la question des orbites périodiques des comètes, et la controverse qui s'ensuit est acerbe⁴⁶.

Et puis, les relations d'Arago et de Le Verrier, qui étaient bonnes en apparence, vont bientôt se dégrader publiquement. C'est que Le Verrier, grisé par son succès, se montre d'une prétention qui irrite tout le monde. Ravi d'avoir forcé Arago à donner son nom à la nouvelle planète, il tente de verrouiller cette situation en essayant de faire qu'Uranus porte à jamais le nom d'Herschel, qui avait effectivement été quelquefois utilisé :

« *Dans mes publications ultérieures, je considérerai comme un strict devoir de faire disparaître complètement le nom*

d'Uranus, et de ne plus appeler la planète que du nom de Herschel. Je regrette vivement que l'impression déjà avancée de cet écrit ne m'ait pas permis, dès à présent, de me conformer à une détermination que j'observerai religieusement dans la suite. »

Il ne réussira pas dans son entreprise : Uranus gardera son nom et la planète Le Verrier deviendra Neptune, conformément à l'usage des astronomes qui baptisent les planètes du nom de divinités antiques.

La politique va se mêler à l'affaire. Guizot, le Premier ministre de Louis-Philippe, voudrait bien mettre à la raison le bouillant Arago, qui est un opposant bien encombrant. Ne pouvant le déconsidérer en tant que député, il tente une manœuvre consistant à lui susciter un rival en tant que Directeur des observations à l'Observatoire, espérant que le Bureau des longitudes choisirait ce rival pour le remplacer. Le Verrier est évidemment le rival idéal, et l'idée de se substituer à Arago à l'Observatoire n'est pas pour lui déplaire. Il se prête à l'opération, mais la Révolution de 1848, qui chasse Guizot, va la faire échouer. Stupéfait d'apprendre jusqu'où va la traîtrise d'un homme qu'il estime et qu'il a soutenu, Arago se brouille définitivement avec lui, de même que tout son clan. Désormais c'est la guerre, et tous les coups sont permis : maladroitement, Babinet s'attaque à la découverte de Le Verrier, parlant à son propos d'« *erreurs énormes* » et proposant même qu'une autre planète, qu'il nomme Hypérion, ajoute son action perturbatrice à celle de Neptune⁴⁷. Le Verrier a beau jeu de lui répondre⁴⁸ :

« 1° Est-il vrai que la direction dans laquelle j'ai placé Neptune comporte une erreur énorme ; excepté pour l'époque de la découverte de M. Galle ou très-peu d'années avant et après ? NON. Cela est faux.

2° Est-il vrai qu'il y ait des erreurs énormes relativement à la distance au Soleil ? NON. Cela est faux. [...] J'ai [simplement] placé Neptune un peu trop loin ».

3° Est-il vrai que la masse théorique de Neptune diffère de la masse déduite de l'observation du satellite à ce point, que ce soit un argument irrésistible contre l'identité du Neptune théorique avec le Neptune observé ? NON. Cela est faux.

[La masse obtenue par Struve à partir de l'orbite du satellite de Neptune, Triton, découvert par Lassell peu après la planète⁴⁹, est 65/100 de la masse prédite par le Verrier, ce qui lui paraît dans les erreurs.] »

Le Verrier devra attendre la mort d'Arago pour s'installer à l'Observatoire. Delaunay écrit dans sa lettre de 1869 :

« À la mort de M. Arago (fin de 1853), l'Empereur a naturellement pensé à M. Le Verrier pour lui succéder à l'Observatoire. C'était tout naturel : la réputation de M. Le Verrier ne permettait pas qu'il en fût autrement. Mais le naturel de cet homme, qui n'était guère connu que de ceux qui, comme moi, l'avaient vu de près depuis plusieurs années, n'a pas tardé à se montrer au grand jour et à produire ses fruits. »

Quatre mois après la mort d'Arago, Le Verrier prend donc possession de l'Observatoire. Il fait détruire l'amphithéâtre pour le remplacer par ses appartements. Mathieu, Laugier et leurs proches sont chassés de l'Observatoire et donc privés de logement et d'instruments ; d'autres astronomes s'en vont d'eux-mêmes. Lucie Laugier récupère les instruments personnels d'Arago comme son polarimètre et son photomètre, qui seront conservés grâce à elle. On offre successivement à Mathieu et à Laugier, en guise de compensation, la chaire d'astronomie à la Sorbonne qu'ils refusent⁵⁰. Mathieu s'occupera de la publication de la *Connaissance des temps* et de l'*Annuaire du Bureau des longitudes*¹, puis se tournera vers l'industrie et dirigera une manufacture de tabacs à Dieppe. Laugier vivra de quelques revenus que lui procure sa qualité d'examinateur à l'École navale, et aura la satisfaction d'être en 1862 élu contre Le Verrier au Bureau des longitudes, en même temps que son ami Delaunay. Ils deviendront tous deux les pivots de la réforme de l'Observatoire de Paris après la révocation de Le Verrier en 1870. Mais ni Mathieu, ni Laugier n'auront les moyens de réaliser des recherches en astronomie à la hauteur de ce qu'on aurait pu peut-être attendre d'eux dans des circonstances plus favorables.

L'Observatoire à la mort d'Arago

Les dernières années d'Arago sont assombries par le diabète et la cécité progressive qu'il entraîne, et sans doute

¹ Souvenons-nous que le Bureau des Longitudes survit à l'irruption de Le Verrier, mais avec des prérogatives considérablement diminuées.

aussi par l'échec de la deuxième République et ses démêlés avec Le Verrier. On a l'impression qu'il néglige quelque peu l'Observatoire pour se consacrer à l'Académie et à ses travaux personnels, en particulier la rédaction et la mise à jour de nombreux mémoires et de l'Astronomie populaire : nous en reparlerons au chapitre 11. Lorsque Le Verrier prend la direction de l'Observatoire en 1854, il rédige un rapport sur la situation de l'institution, qu'il est intéressant de consulter⁵¹.

Pour Le Verrier, l'Observatoire doit redevenir « *un observatoire de premier ordre* » comparable à ceux de Greenwich ou de Poulkova en Russie. La grande lunette de Brunner devrait lui permettre de retrouver ce rang malgré ses défauts prévisibles, notamment sa sensibilité aux vibrations (on sait ce qu'il en est advenu). Mais ce n'est pas tout :

- la lunette méridienne a de graves défauts qu'il faut réparer ; elle doit être ultérieurement remplacée par une lunette plus grande, de manière à rivaliser avec Greenwich ;
- il faut pour les observations du passage des astres au méridien lire l'heure sur plusieurs horloges, au lieu d'une seule dont la marche ne peut pas être facilement vérifiée ;
- la lunette du cercle méridien de Gambey n'est pas assez puissante et doit être remplacée ;
- il faut construire un cercle méridien de 10 pouces d'ouverture qui soit en même temps un instrument des passages (Greenwich a un tel instrument de 8 pouces), à placer à l'Ouest du bâtiment central à l'emplacement de l'amphithéâtre « *qui est et demeurera désormais sans objet* »^m ;
- il faut aussi penser à la construction future de grands objectifs de lunette. On ne sait pas encore que l'objectif fait par les Lerebours pour la grande lunette est inutilisable. Mais de toute façon, Le Verrier doit penser qu'on ne peut pas compter uniquement sur Lerebours fils (était-ce parce qu'il était un protégé d'Arago ?) : « *N'oublions pas que les trois grands objectifs*

^m C'est en réalité un appartement de 400 m² qui sera construit pour Le Verrier à l'emplacement de l'amphithéâtre.

de douze pouces qui fonctionnent aujourd'hui à Londres, à Cambridge, à Markree, sont de fabrication française, et que depuis quinze ans l'Observatoire de Paris aurait pu posséder l'un d'eux au prix modique de douze mille francs, si les offres de notre célèbre opticien Cauchoix n'avaient point été repoussées. Cette conduite a porté ses fruits : la fabrique des grands verres d'optique est aujourd'hui le privilège presque exclusif de la ville de Munich. » Cauchoix étant mort en 1845, Le Verrier fait dans une longue note de la publicité pour « les verres d'optique fabriqués depuis quelques années par MM. Maës et Clemandot à la cristallerie de Clichy » ;

– enfin Le Verrier regrette — et il est bien placé pour le savoir — que contrairement à ce qui se passe à Greenwich « rien [n'ait] encore été fait en France pour la réduction des observations. On les a jusqu'ici publiées à l'état brut et sans réduction aucune, laissant même à d'autres le soin d'en déduire les ascensions droites et les déclinaisons. »


Le Verrier décrit aussi la situation des observateurs, qui font un travail pénible et mal rémunéré (3 000 francs au plus par an pour les astronomes adjoints, et 5 000 francs pour les astronomes titulaires), tandis que leurs logements à l'Observatoire sont « inhabitables ». Mais il juge qu'il ne doivent pas se disperser dans des tâches diverses comme l'enseignement.

À part ce dernier point dont on peut discuter, le rapport de Le Verrier nous paraît modéré et objectif : visiblement l'Observatoire ne va pas bien. Ses propositions sont raisonnables, notamment la mise en pratique de l'utilisation du télégraphe électrique pour mesurer les longitudes et distribuer l'heure, et surtout la création d'un véritable service météorologique. Rien de bien nouveau, en revanche, en ce qui concerne le programme de recherches purement astronomiques. Mais Le Verrier va se comporter en dictateur, ce qui dressera progressivement le personnel contre lui et entraînera sa révocation en 1870 : à ce moment-là, l'Observatoire ne sera pas en meilleur état qu'à son arrivée, et ce d'autant plus que Le Verrier aura porté toute son attention au Service météorologique qu'il a fondé, au détriment des observations astronomiques.

Chapitre 8

Arago astronome

Mardi 13 Novembre 1840
Mesures des Diamètres de Jupiter

Diamètres pris dans le sens des bandes			
au bord inférieur mordant	au bord supérieur langue	au bord demi élévation	
677,5 <i>éliminé</i>	708,9	738 <i>éliminé</i>	à 8 ^h Jupiter bien tenu moyen grossissement
684,5 <i>2^m</i>	706,9	732 <i>2^m</i>	
686 <i>2^m</i>	709,9	718 <i>2^m</i>	
680 <i>2^m</i>	708,0	716,9	
	706,9		
	706,9		
	706,957		
Perpendiculairement aux bandes			
643 <i>éliminé</i>	677,9	696	à 9 ^h Jupiter assez bien tenu
672 <i>éliminé</i>	680	708 <i>éliminé</i>	
	675		
	673		
	674		
	672		
	675,260		
Le bord inférieur de la planète supérieure opposé au bord supérieur de la bande supérieure de la même planète			
	517		à 10 ^h moyen grossissement
	518		
	524		
	514		
	518,125		

Page d'un registre d'observations autographe d'Arago, avec un dessin de Jupiter montrant la double image fournie par son micromètre.

Dans sa postface à la réédition de 1987 du livre de Maurice Daumas sur Arago¹, Jean Dhombres écrit :

« Il serait peut-être temps que quelque lointain successeur d'Arago à l'Observatoire entreprenne de cerner l'apport précis d'Arago en astrophysique. »

À dire vrai, André Danjon, qui dirigeait depuis 1953 l'Observatoire de Paris, avait déjà écrit cette année-là un article remarquable sur la question². Mais il est quelque peu incomplet et nous allons maintenant nous employer à le compléter. Ce faisant, nous avons l'impression de réparer une injustice : si une grande partie du travail astronomique d'Arago appartient à l'activité quotidienne de l'époque (mesure de la position des astres, détermination de l'orbite des comètes, etc.), il a eu quelques intuitions remarquables et originales que l'on a oubliées à tort. On peut même le considérer comme le fondateur de l'astrophysique, puisqu'il fut le premier à déterminer à distance de façon rigoureuse la nature physique de la surface d'un astre : le Soleil. Avant d'aborder ce point, il nous faut d'abord nous replacer dans le contexte de l'époque.

L'astronomie en France à l'époque d'Arago

Le triomphe de la mécanique newtonienne

Dès la création de la théorie de la gravitation, Newton l'a appliquée au calcul de l'orbite des comètes. Sa méthode fut reprise en 1705 par Halley pour calculer l'orbite de 24 comètes ; elle lui permit de prédire en 1716 le retour vers 1758 de la comète à laquelle on a donné son nom. Il ne devait pas le voir car il est mort en 1742. Halley n'avait pas tenu compte de l'attraction par les planètes qui perturbe le mouvement des comètes, et qui aurait donc pu retarder ou avancer l'apparition de sa comète. En 1757, Clairaut se mit au travail pour calculer plus précisément l'orbite de la comète de Halley, avec l'aide de Nicole Lepaute, une mathématicienne qui avait épousé un horloger célèbre. Ils prédirent qu'elle n'atteindrait le périhélie, c'est-à-dire le point où elle serait le plus proche du Soleil, qu'en avril 1759. En fait elle y parvint un peu plus tôt, au mois de mars. La prédiction de Halley revue par

Clairaut fut à juste titre considérée comme un triomphe de la mécanique newtonienne. C'est une des raisons pour lesquelles la théorie de Newton devint enfin populaire en France, après pas mal de résistance : on sait que Voltaire fut, contre vents et marées, un des rares propagandistes de cette théorie, notamment en suscitant la traduction des *Principia* de Newton par son amie la Marquise du Châtelet. Notre pays s'est heureusement rattrapé grâce à Clairaut, à d'Alembert, à Lagrange et surtout à Laplace, dont le monumental *Traité de mécanique céleste* paraît en cinq volumes de 1799 à 1825. Pour Laplace, le Système solaire est un immense mécanisme se mouvant sous l'effet de la force universelle de la gravitation, et il doit être possible d'en prédire le comportement pour l'éternité. En témoigne le passage suivant de son *Exposition du système du monde*³ :

« Au milieu de l'infinie variété des phénomènes qui se succèdent continuellement dans les cieux et sur la terre, on est parvenu à démêler le petit nombre de loix générales que la matière suit dans ses mouvemens. Tout leur obéit dans la nature ; tout en dérive aussi nécessairement que le retour des saisons ; et la courbe décrite par l'atôme léger que les vents semblent emporter au hasard, est réglée d'une manière aussi certaine, que les orbes planétaires. [...] Les géomètres [...] ont enfin réduit la mécanique entière à des formules générales qui ne laissent plus à désirer que la perfection de l'analyse. »

Cette conception mécaniste et déterministe de l'Univers imprègne non seulement l'astronomie, mais toute la science du XIX^e siècle, comme nous l'avons vu au chapitre 3 à propos de l'optique de Fresnel. Pour en revenir aux comètes, le calcul de leur trajectoire incluant les perturbations par les planètes, même s'il reste long et pénible, est devenu une routine à l'époque d'Arago.

L'apport d'Herschel

L'influence de Laplace fait que l'on a en France une tendance à réduire l'astronomie à l'étude du mouvement de la Terre et des autres astres du système solaire, sans se préoccuper de leur nature : si Charles Messier publie en 1771 le premier catalogue de nébuleuses, c'est surtout pour éviter de les confondre avec des comètes, qui sont

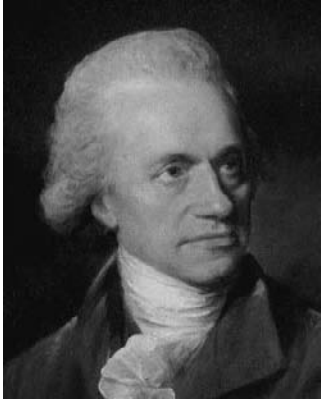


Figure 8.1. William Herschel (1738-1822).

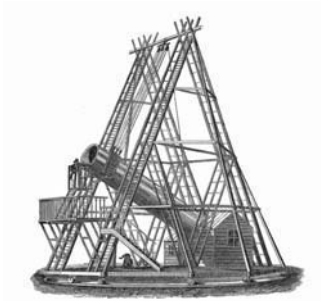


Figure 8.2. Le grand télescope de William Herschel (1,20 m de diamètre), terminé en 1789.

au centre de ses intérêts. Il en va autrement en Angleterre, où l'on étudie les variations d'éclat de certaines étoiles, et où des esprits originaux comme John Michell et surtout William Herschel (encadré 8.1 ; figure 8.1) s'intéressent à divers aspects du ciel. Avec les grands télescopes de sa construction (figure 8.2), Herschel fait des découvertes nombreuses et variées : celles de la planète Uranus, d'étoiles doubles dont les deux composantes tournent l'une autour de l'autre, et du mouvement du Soleil parmi les étoiles voisines. Il étudie des nébuleuses de différentes sortes dont certaines, résolues en étoiles faibles, ou du moins que l'on croit pouvoir être résolues^a, lui semblent des équivalents lointains de cette Voie lactée qu'il commence à cartographier. D'autres nébuleuses entourent une étoile, et représentent pour lui différentes étapes de la formation stellaire par contraction de matière nébulaire (on sait aujourd'hui que ces nébuleuses représentent plutôt de la matière éjectée ou ionisée par l'étoile centrale, mais qu'importe : une idée fructueuse est lancée). En 1811, Herschel écrit⁴ :

« Il est concevable qu'au cours du temps ces nébuleuses qui sont déjà dans un état de compression puissent ensuite se condenser encore davantage pour former réellement des étoiles. »

Assez curieusement, les découvertes et les idées d'Herschel sont accueillies plus fraîchement en Angleterre qu'en Allemagne ou en France. Il est vrai que, contrairement à la plupart des astronomes anglais de son époque, Herschel n'appartient pas au clergé et que ses théories paraissent s'opposer à la description biblique de la Création. En France, on connaît très bien et on admire ses travaux, comme on peut en juger par le grand nombre de citations et de traductions parues dans diverses revues scientifiques, qui vont même jusqu'à reproduire ses dessins de nébuleuses (figure 8.3). On lit par exemple en 1811 sous la plume de Delamétherie⁵ :

^a Dans l'*Astronomie populaire* t. 1 p. 516, Arago cite des « paroles récentes » de John Herschel, le fils de William : « Dans toutes les nébuleuses (résolubles), l'observateur remarque (quel que soit le grossissement) des élançements stellaires, ou du moins il croit sentir qu'on les apercevrait si la vision devenait plus nette. La nébuleuse d'Orion produit une sensation toute différente, elle ne fait naître aucune idée d'étoiles. »

« Herschel nous a étonné par ses nombreuses découvertes en Astronomie. Il a fait connoître la planète qui porte son nom, ses six satellites et deux nouveaux satellites à Saturne, et il a fait voir que son anneau étoit double^b. Mais ses découvertes sur les étoiles, leur position, leur nombre, leur éloignement, et particulièrement sur les nébuleuses, sont encore bien plus surprenantes : elles ont agrandi pour nous l'univers, au point qu'il est des étoiles dont la lumière ne peut parvenir à la terre qu'en deux millions d'années ; elles nous en ont donné une idée bien différente de celle qu'on avoit avant lui. On ne soupçonnoit nullement les faits que le travail, la patience et le génie de Herschel nous ont révélés, et la philosophie naturelle lui doit peut-être plus qu'à aucun autre astronome. »

Vingt ans après la mort d'Herschel, Arago lui-même publie un éloge enthousiaste et bien documenté, auquel il ajoute beaucoup d'idées personnelles⁶. Les observations et les remarques d'Herschel concernant les nébuleuses munies d'une étoile centrale sont considérées par Laplace comme de fortes preuves à l'appui de sa théorie sur la formation du système solaire par condensation d'une nébuleuse primitive. Il est même possible qu'Herschel soit à l'origine des idées de Laplace. D'après Delambre⁷,

« M. le comte Laplace et M. Herschell sont parvenus par des routes opposées, à la considération du soleil environné autrefois d'une vaste atmosphère; le premier, en remontant à cet état du soleil, par la considération des phénomènes singuliers du système solaire; le second, en y descendant par les progrès de la condensation de la matière nébuleuse. Cette rencontre, en faisant concourir les preuves qu'ils ont apportées l'un et l'autre, de leurs idées, donne à leur ensemble, une probabilité fort approchante de la certitude. »

Malheureusement, l'influence de Laplace va détourner pour longtemps les astronomes français de l'observation des nébuleuses, puisque la théorie paraît suffire.

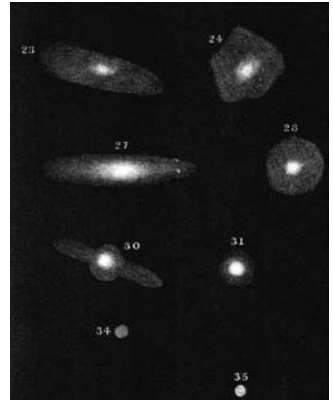


Figure 8.3. Quelques-unes des nébuleuses dessinées par William Herschel. Noter la condensation centrale, qu'il considère comme une étoile en formation.

^b C'est en réalité Cassini I qui a découvert dans l'anneau de Saturne la division à laquelle on a donné son nom, mais beaucoup d'astronomes l'ont oublié et parlent de « *division herschélienne* » : on ne prête qu'aux riches !

Encadré 8.1. William Herschel

Né à Hanovre d'un père musicien, Herschel est destiné à la musique. Il entre comme hautboïste et violoniste dans la « *bande* » du régiment en 1753. Ayant démissionné en 1756, il s'établit en Angleterre où il occupe diverses fonctions musicales, compose et dirige des orchestres avec succès. En 1766, il obtient un poste d'organiste et de maître de chapelle à Bath. Attiré par l'astronomie, il s'y consacre en partie en 1772. Il veut comprendre la « *construction des cieux* », c'est-à-dire la nature et la distribution des étoiles et des nébuleuses, ce qui est très original (il n'y a guère que Kant et Michell qui aient entrepris une telle démarche à l'époque). Dans ce but, il construit des télescopes de plus en plus grands (jamais de lunettes astronomiques) avec lesquels il fait en 1779 des relevés du ciel. Il découvre le 13 mars 1781, dans la constellation des Gémeaux, un objet qui n'est pas ponctuel comme une étoile : c'est la planète Uranus, dont le diamètre apparent n'est pourtant que de 4 secondes de degré. Cette découverte le rend célèbre, et il reçoit du roi une pension qui lui permet d'abandonner la musique, bien qu'elle soit plus faible que ses revenus précédents. Elle est cependant insuffisante pour financer ses grands télescopes (son favori, qui a 45 cm de diamètre, a une la qualité optique remarquable) : il doit donc fabriquer et vendre des miroirs et même des télescopes complets (il y en aura plusieurs centaines). Un financement spécial du roi lui permet de construire le géant de la figure 8.2. Les activités techniques d'Herschel ne l'empêchent pas de faire d'innombrables observations avec l'aide de sa sœur Caroline, et de remarquables découvertes. Herschel visite Paris en 1802, où il rencontre Bonaparte et Laplace. Par son habileté à construire et à utiliser ses instruments et par ses idées novatrices, Herschel est incontestablement un des plus grands astronomes de tous les temps.

Le programme du Bureau des longitudes

Même après la mort de Laplace en 1827, l'admiration pour Herschel n'influencera pas notablement le cours de

l'astronomie française. Bien qu'il vienne en 1834 de nommer Arago directeur des observations de l'Observatoire, le Bureau des longitudes, qui n'a nullement l'intention d'abandonner ses prérogatives, arrête un programme « *destiné à servir de règle aux astronomes de l'Observatoire de Paris [...] pour l'année 1834* ». Ce programme, dont l'encadré 8.2 reproduit de larges extraits, est on ne peut plus classique : il s'agit avant tout d'observer la position des étoiles, de la Lune, du Soleil, des planètes et des comètes, ainsi que les occultations d'étoiles par la Lune et les éclipses des satellites de Jupiter. Le but de ces observations, que l'on peut qualifier d'observations de routine, est de garder le temps, de favoriser la détermination des longitudes, et de vérifier les prédictions de la mécanique céleste, ce qui rentre évidemment dans les attributions normales d'un observatoire. Il est également question d'établir un nouveau catalogue d'étoiles destiné à remplacer celui publié en 1801 par Lalande et son neveu Michel Lefrançois de Lalande, qui comporte 50 000 étoiles mais dont la précision est sans doute jugée insuffisante, et d'essayer de mesurer la parallaxe d'étoiles. Le catalogue n'aboutira pas ; mais même s'il avait été réalisé il n'aurait pas pu servir à Le Verrier pour découvrir Neptune. En effet, il s'agissait de mesurer et de cataloguer avec précision la position des étoiles les plus brillantes, plutôt que de donner la position approximative d'un très grand nombre d'étoiles faibles, ce dont Le Verrier aura besoin : nous avons vu qu'il s'est adressé aux astronomes de Berlin, qui avaient à leur disposition une carte montrant les étoiles jusqu'à la magnitude 9.

Encadré 8.2. Extraits des instructions du Bureau des longitudes pour 1834⁸

« Le Soleil, la Lune et les planètes seront observés au méridien avec l'instrument du passage et le Cercle mural, toutes les fois que l'état du ciel le permettra. [...] »

« La Lune, comme le Soleil et les planètes, sera comparée aux étoiles principales placées dans le voisinage. De plus, et dans la vue de favoriser la détermination des longitudes terrestres, on observera soit avant, soit après le passage de cet astre au méridien, toutes les petites étoiles qui auront été indiquées à l'avance dans les diverses éphémérides. »

« Le Bureau recommande aux astronomes, d'une manière toute particulière, les observations de Mercure »

qui jusqu'ici ont été trop généralement négligées, et celles des quatre nouvelles planètes [les petites planètes Cérès, Pallas, Junon et Vesta découvertes entre 1801 et 1807].

« À l'apparition d'une comète, les déterminations journalières de l'ascension droite et de la déclinaison de cet astre, marcheront en première ligne dans les devoirs imposés aux astronomes.

« Toutes les immersions et émergences d'étoiles [derrière la Lune], indiquées dans les éphémérides pour les six premières grandeurs, seront régulièrement observées. [...]

« On observera régulièrement les immersions et les émergences des satellites de Jupiter. [...]

« Le Bureau attachera le plus grand prix à doter promptement l'Astronomie d'un catalogue d'étoiles fondé sur les observations de Paris et qui se fasse également remarquer par son exactitude et par son étendue. Parmi les étoiles destinées à faire partie du catalogue qui vient d'être mentionné, seront comprises au premier rang celles dont les observations peuvent servir le plus avantageusement à la détermination des constantes de l'aberration et de la nutation.

« Aussitôt que la lunette murale [le cercle mural de Fortin en cours d'amélioration] aura été établie, on s'occupera assidûment des observations de la parallaxe annuelle des étoiles voisines du zénith de Paris. [...]

« Le Bureau arrête qu'il sera procédé, sans retard, au fur et à mesure des travaux, à tous les calculs que ces réductions nécessitent^c. »

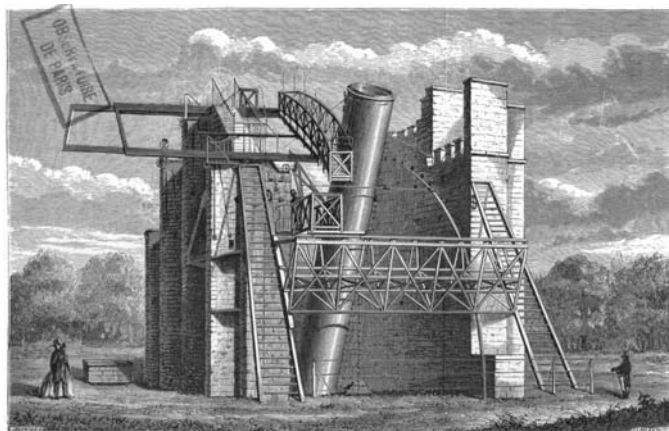
Dans ses instructions, le Bureau des longitudes se réserve de régler « par des programmes séparés les travaux qui doivent être faits avec l'équatorial [de Gambey], les instruments magnétiques et météorologiques ». Ces instructions supplémentaires ne verront jamais le jour, ce qui n'empêchera pas les observations magnétiques et météorologiques d'être faites avec régularité, grâce au zèle d'Arago ; les astronomes seront donc libres de faire les recherches qu'ils veulent avec l'équatorial de Gambey, malheureusement peu

^c Cette recommandation n'est pas anodine : il y avait eu beaucoup de retard dans la réduction des observations, et Arago en particulier avait une fâcheuse tendance à simplement archiver ses observations brutes sans les dépouiller.

puissant. Parmi ces recherches, on peut mentionner quelques observations d'étoiles doubles brillantes comme ξ *Ursae Majoris* et ζ *Herculis* par Félix Savary et Antoine Yvon Villarceau⁹ : mais pas de quoi lutter avec les « immenses travaux d'observation de MM. Struve et de Sir John Herschel », qui disposaient d'instruments bien plus performants en Russie et en Angleterre. Laugier mesure bien la position de quelques nébuleuses, mais il se plaint que l'équatorial ne lui permet qu'à peine de voir des objets qu'Herschel considérait comme brillants. En définitive, c'est pour l'observation des comètes que l'équatorial s'est révélé le plus utile : c'est d'ailleurs dans ce but qu'il avait été construit.

L'abandon des grands télescopes en France après l'échec de celui de Dom Noël a été une erreur ; pendant ce temps, Herschel et ses successeurs, notamment son fils John, accumulent de magnifiques observations avec leurs grands télescopes. Lord Rosse découvre en 1845 la structure spirale de la galaxie des Chiens de chasse avec son « *Léviathan* » de 6 pieds (1,8 m) de diamètre (figure 8.4 et figure 8.5). Arago n'ignore rien de ces observations, dont il parle abondamment dans son *Astronomie populaire*, mais il n'envisage pas la construction d'un grand télescope. Il n'y a pas non plus en France de grande lunette comme celles qui existent en Allemagne, en Russie, en Angleterre et même aux États-Unis, et qui permettent notamment d'excellentes observations d'étoiles doubles. C'est ce manque qu'essaye de combler Arago en faisant construire la lunette de 38 cm de diamètre de la coupole Est, mais cet instrument sera lui-même un échec, comme nous l'avons vu. Ce n'est qu'après la construction des télescopes de 40 cm puis de 80 cm par Foucault que les observatoires français pourront aborder de nouveaux sujets : à Paris, Charles et Georges Rayet découvriront en 1867 les étoiles à raies d'émission nommées étoiles de Wolf-Rayet ; à Marseille, Édouard Stéphan cataloguera 800 nébuleuses et galaxies nouvelles, dont le célèbre quintette de galaxies qui porte son nom, puis Charles Fabry et Henri Buisson donneront pour la première fois en 1914 une estimation de la température d'une nébuleuse gazeuse, la Nébuleuse d'Orion, grâce à l'interféromètre inventé par Fabry et Alfred Perot. Il est significatif que les observations de Fabry et Buisson aient été publiées dans un journal américain, l'*Astrophysical Journal* : sans doute n'y accordait-on toujours pas beaucoup d'intérêt en France.

Figure 8.4. Le Léviathan de Lord Rosse.



Les observations astrométriques à l'Observatoire de Paris

Arago commence à observer avec Bouvard le 22 mars 1805, dès sa nomination comme secrétaire-bibliothécaire de l'Observatoire¹⁰ : travail de routine comprenant, en plus des mesures de temps et de déclinaison d'étoiles, des observations des éclipses des satellites de Jupiter et des occultations d'étoiles par la Lune, avec les télescopes de Dollond et de Short et le télescope à miroir de platine de Carroché. Arago n'observe plus l'année suivante, car il est parti en Catalogne ; mais il recommence à observer dès la fin de son odyssée, en septembre 1809. Sa participation est probablement régulière malgré ses occupations déjà nombreuses, et il continuera même à observer de temps en temps après sa nomination en 1834 comme Directeur des observations.

L'activité proprement astronomique du jeune Arago avant son départ pour la mesure du méridien en Catalogne n'a rien qui mérite d'être retenu, en dehors de ses premières tentatives de mesure de variations de la vitesse de la lumière, dont nous avons parlé au chapitre 3 ; elles appartiennent d'ailleurs plutôt au domaine de la physique bien qu'elles aient utilisé des observations astronomiques. Ces mesures reprennent à son retour en 1809. Arago utilise à la même époque le cercle répétiteur de Fortin pour une nouvelle détermination de la latitude de l'Observatoire ; Mathieu et Humboldt en font de même, mais leurs

résultats ne concordent pas avec ceux d'Arago, et ils vont passer beaucoup de temps à élucider l'origine de ces différences. D'après Arago, celles-ci proviennent d'erreurs de « *collimation individuelle* », c'est à dire de différences de mise au point de l'instrument liées aux défauts de l'œil de chaque observateur¹¹. C'est en apparence beaucoup de temps perdu, mais c'est comme cela qu'on devient un vrai astronome.

Mouvements propres et parallaxes

En 1812, Arago et Mathieu commencent une nouvelle série d'observations destinées à déterminer la distance d'une étoile, la « *61^e du Cygne* » (61 Cygni dans la nomenclature actuelle), sur laquelle leur attention a été attirée par son déplacement rapide sur le ciel. Ce déplacement (appelé *mouvement propre* par les astronomes) laisse présager que l'étoile est proche, ce qui s'est révélé plus tard être le cas. Arago et Mathieu ne peuvent cependant obtenir qu'une limite inférieure de la distance ; leurs nouvelles observations en 1825 ne feront pas mieux¹².

Pour comprendre ces observations et les raisons de leur échec, il nous faut expliquer ce que sont le mouvement propre et la parallaxe des étoiles.

Le mouvement propre (figure 8.6) est un déplacement apparent à long terme de l'étoile sur le ciel, que l'on exprime en seconde de degré par an. On le détermine en comparant des mesures de la position de l'étoile faites à des époques éloignées, en ayant bien entendu fait les corrections nécessaires de précession, de nutation et d'aberration. Lorsque le mouvement propre est grand, on peut le détecter directement en comparant les positions de l'étoile mesurées à différentes époques par des observations méridiennes^d. C'est ainsi que Jacques Cassini (Cassini II) a déterminé le premier un mouvement propre, celui d'Arcturus (α Bootis), en comparant ses observations de 1738 avec celles de Jean Richer à Cayenne en 1672 : en 66 ans, Arcturus s'était déplacé de $150''$ alors qu'une étoile voisine, η Bootis, n'avait pas bougé. Inutile de

^d Il est préférable de mesurer la position de l'étoile par rapport à la moyenne de nombreuses étoiles faibles, donc supposées lointaines et de mouvement propre très petit ; mais ce ne sera guère possible qu'après l'avènement de la photographie astronomique, à la fin du XIX^e siècle.

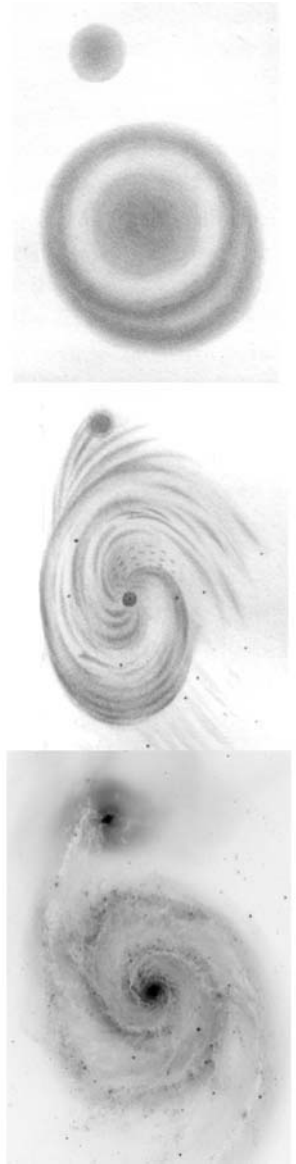


Figure 8.5. La galaxie des Chiens de chasse (M51) vue de haut en bas par John Herschel, par Lord Rosse avec son Léviathan et aujourd'hui par Jean-Charles Cuillandre avec le télescope France-Canada-Hawaï.

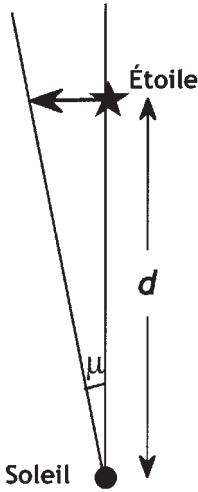


Figure 8.6. Le mouvement propre. L'étoile se déplace par rapport aux étoiles lointaines, supposées fixes. Le déplacement angulaire annuel est μ , exprimé en secondes de degré par an. La vitesse latérale de l'étoile par rapport au Soleil, v , est liée à μ et à la distance d de l'étoile par la relation $v(\text{km/s}) = 1,45 \mu''/\text{an} \times d$ (années-lumière).

dire que cette découverte, qui était une entorse au dogme des « étoiles fixes », a fait du bruit à l'époque. En 1783, Herschel peut discuter 14 mouvements propres bien déterminés, pour montrer qu'ils sont principalement dus au déplacement du système solaire vers un point situé dans la constellation d'Hercule¹³ : un résultat tout à fait remarquable, qui sera confirmé et précisé par la suite, à mesure que d'autres mouvements propres deviendront disponibles. Il devient alors possible, en prenant le problème à l'envers, d'obtenir une idée au moins relative de la distance d'un astre en déterminant son mouvement propre s'il est dominé par le mouvement du système solaire : le déplacement angulaire de l'astre est d'autant plus petit qu'il est plus éloigné. C'est ce que l'on va essayer de faire pour les nébuleuses, car on n'a aucune idée de leur distance. Pour celles qui ont en leur centre une étoile, Arago suggère dans son éloge de William Herschel de vérifier qu'il y a bien un lien physique entre la nébuleuse et l'étoile en comparant leur mouvement propre, ce qui n'est guère aisé dans la pratique. A partir de 1849, Laugier établit un catalogue de positions de nébuleuses mesurées avec l'équatorial de Gambey, dans le but de les comparer avec celles données par Messier et par John Herschel¹⁴. Il veut ainsi voir si certaines d'entre elles, qui ne participeraient pas au déplacement apparent systématique des étoiles voisines dû au mouvement du système solaire, ne seraient pas situées très loin, comme ce dernier l'avait d'ailleurs suggéré. C'est en principe une bonne idée, mais sa mise en pratique est impossible, car la position de ces objets diffus ne peut pas être mesurée avec une précision suffisante pour en déterminer le mouvement propre. Laugier ne tirera d'ailleurs aucune conclusion de la comparaison des catalogues.

Venons-en maintenant à la parallaxe. Les étoiles qui ont un grand mouvement propre ont, nous l'avons dit, toutes les chances d'être proches : ce sont donc de bons candidats pour en déterminer la distance. La manière la plus directe d'obtenir cette distance (et la seule possible jusqu'au début du xx^e siècle) est de mesurer la parallaxe géométrique de l'étoile (figure 8.7), c'est à dire l'amplitude de son déplacement annuel dû au mouvement de la Terre sur son orbite. On peut en principe repérer ce déplacement par rapport à des étoiles beaucoup plus éloignées, qui sont à bon droit supposées fixes. Cette méthode a été suggérée pour la première fois par Galilée. Différents astronomes, dont Herschel, vont essayer d'observer la parallaxe d'étoiles brillantes possédant un grand mouvement propre.

Ils mesurent donc à plusieurs époques de l'année la position de l'étoile par rapport à des étoiles voisines plus faibles, qui sont implicitement supposées se trouver plus loin. Aucun d'eux ne parviendra à un résultat positif. Mais Herschel fait à cette occasion, en 1803, une découverte fondamentale : celle d'étoiles binaires physiquement liées qu'il voit, grâce à ses observations répétées, tourner l'une autour de l'autre. Cette découverte vient mettre en doute l'hypothèse que les étoiles faibles sont nécessairement éloignées, car les composantes de ces systèmes doubles ont dans certains cas des éclats très différents, bien qu'étant évidemment à la même distance. Il semble donc dangereux de repérer la position d'une étoile brillante par rapport à des étoiles faibles pour en déterminer la parallaxe.

C'est pourquoi Arago et Mathieu inaugurent en 1812 une méthode directe absolue pour obtenir la parallaxe, qui n'utilise pas la position de l'étoile étudiée par rapport à des étoiles voisines. Ils mesurent avec un cercle répétiteur (sans doute celui de Fortin) les variations au cours de l'année de la distance zénithale de l'étoile, à son passage au méridien. Malheureusement on ne peut ainsi, en raison des erreurs de mesure, de la réfraction atmosphérique et d'instabilités possibles de l'instrument, que mesurer des parallaxes plus grandes que $0'',5$ qui sont extrêmement rares : cette méthode est donc d'emblée vouée à l'échec, et ne donnera d'ailleurs aucun résultat positif. C'est pourtant celle qui est encore recommandée en 1834 dans les Instructions du Bureau des longitudes, sans doute sous la pression d'Arago.

La première parallaxe n'est finalement obtenue qu'en 1838 par Bessel : elle concerne l'étoile même qui avait été étudiée par Arago et Mathieu, 61 Cygni. Bessel utilise la méthode différentielle classique, en mesurant avec un héliomètre (figure 8.8), à différentes époques de l'année, la distance angulaire de 61 Cygni à deux étoiles voisines. Admiratif, mais en même temps vexé par cette découverte, Arago rappelle alors ses propres mesures¹⁵ :

« Les astronomes [...] ne seront pas fâchés de voir que la méthode des distances au zénith absolues, observées au cercle répétiteur, donne à fort peu près le même résultat que les mesures héliométriques de M. Bessel. Celles-ci, assurément très-exactes, ont l'inconvénient de supposer que les étoiles de comparaison n'ont pas de parallaxe sensible. »

Le « même résultat » n'est en fait qu'une limite supérieure de 0,5 seconde de degré ($0'',5$) pour les variations

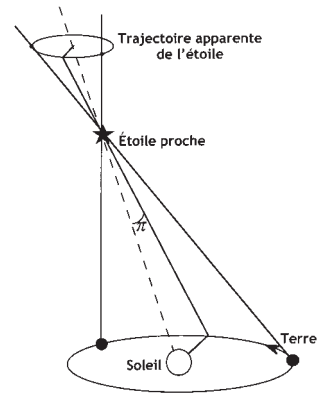
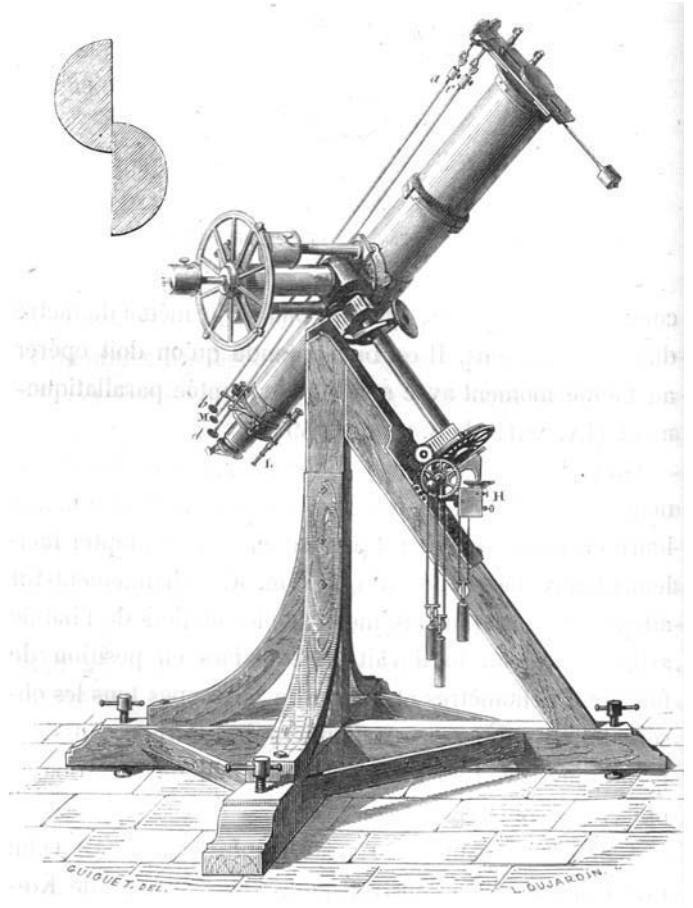


Figure 8.7. La parallaxe géométrique annuelle des étoiles. Au cours de la révolution annuelle de la Terre autour du Soleil, une étoile proche paraît se déplacer par rapport aux étoiles lointaines selon une ellipse. L'angle π sous-tendu par le demi-grand axe de cette ellipse est la parallaxe, exprimée en secondes de degrés. Elle est inversement proportionnelle à la distance de l'étoile. Une étoile dont la parallaxe est de $1''$ est à une distance de 3,26 années-lumière, soit $3,08 \cdot 10^{16}$ mètres.

Figure 8.8. L'héliomètre construit par Fraunhofer pour l'Observatoire de Königsberg, et utilisé par Bessel pour mesurer la parallaxe de 61 Cygni. Comme on peut le voir sur la petite figure en haut à gauche, l'objectif, qui peut tourner autour de l'axe de la lunette, est scié en deux et l'on peut en faire glisser l'une des moitiés par rapport à l'autre. Chaque étoile donne alors deux images dont on peut régler l'orientation et la séparation. En faisant coïncider une de ces deux images avec une des images d'une étoile voisine, on peut connaître avec précision l'angle qui sépare ces deux étoiles.



éventuelles de la distance zénithale de 61 Cygni, tandis que Bessel a effectivement mesuré une parallaxe de $0''{,}31$, révisée un peu plus tard en $0''{,}375$. La mesure de Bessel a un retentissement considérable, car jusque là personne n'avait imaginé que les étoiles puissent être aussi lointaines. Aussi les écrits de l'époque sont-ils pleins de considérations émerveillées sur l'énorme distance de l'étoile et les nombreuses années que la lumière a mis pour nous en parvenir. Cependant Arago ne mentionne pas la mesure dans sa « *table chronologique des principales découvertes astronomiques* »¹⁶. Serait-ce encore un signe de rancœur ?

Les parallaxes géométriques sont restées longtemps très difficiles à mesurer, et les astronomes ont souvent eu tendance à sous-estimer les erreurs de mesure, comme le

montre le tableau 8.1. L'Observatoire de Paris ne brillera pas en cette matière, malgré les efforts d'Hervé Faye. Celui-ci annonce en 1847 qu'il a déterminé une parallaxe de $1'',05$ pour l'étoile à grand mouvement propre Groombridge 1830. Cependant l'allemand Wichmann, utilisant les mesures faites par Bessel juste avant sa mort survenue l'année précédente, ne trouve que $0'',183$: d'où une controverse qui va durer plusieurs années, chacun campant sur ses positions¹⁷. C'est la mesure de Faye qui se révélera aberrante. Ensuite, les progrès seront lents, même après l'avènement de la photographie astronomique, et les premières parallaxes vraiment précises ne seront obtenues que de 1989 à 1993 grâce au satellite astrométrique Hipparcos.

Tableau 8.1. Les mesures de parallaxe obtenues dans les différents observatoires mondiaux jusqu'en 1854, comparées aux mesures récentes.

Les étoiles sont classées par mouvement propre croissant. Les mesures anciennes du mouvement propre sont en assez bon accord avec les mesures récentes. Sauf pour la détermination de Faye pour Groombridge 1830, les déterminations anciennes de la parallaxe sont compatibles avec les déterminations récentes, mais l'erreur donnée par les auteurs anciens, qui est reproduite ici, est souvent très sous-estimée. L'erreur probable des mesures de parallaxe récentes est inférieure à $0'',001$ (mesures Hipparcos) sauf pour 61 Cyg où elle est de $0'',029$.

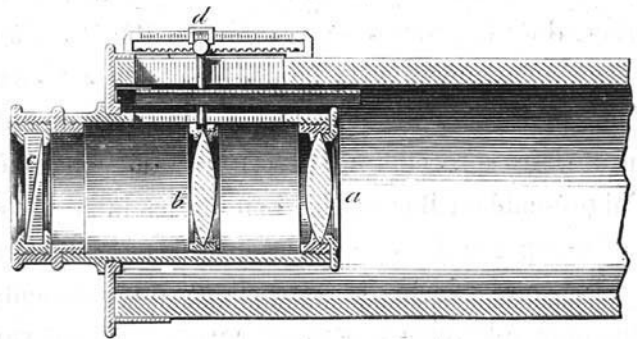
Étoile	Mouvement propre	Parallaxe	Auteur	Mesures récentes	
				Mouvement propre	Parallaxe
Polaire (α UMi)	$0'',035/\text{an}$	$0'',091 \pm 0'',010$	Lindenau, Struve, Preuss, Peters	$0'',046/\text{an}$	$0'',008$
α Lyr	$0'',364/\text{an}$	$0'',232 \pm 0'',023$	Struve, Peters	$0'',351/\text{an}$	$0'',129$
Capella (α Aur)	$0'',461/\text{an}$	$0'',046 \pm 0'',200$	Peters	$0'',434/\text{an}$	$0'',077$
τ UMa	$0'',746/\text{an}$	$0'',133 \pm 0'',106$	Peters	$0'',491/\text{an}$	$0'',068$
Sirius (α CMa)	$1'',234/\text{an}$	$0'',23 \pm 0'',07$	Henderson, Maclear	$1'',339/\text{an}$	$0'',379$
Arcturus (α Boo)	$2'',269/\text{an}$	$0'',197 \pm 0'',073$	Peters	$2'',279/\text{an}$	$0'',089$
α Cen	$3'',674/\text{an}$	$0'',97 \pm 0'',055$	Henderson, Maclear	$3'',763/\text{an}$	$0'',742$
61 Cyg	$5'',123/\text{an}$	$0'',375 \pm 0'',011$ $0'',52 \pm 0'',025$	Bessel (révision) Struve 1854	$5'',228/\text{an}$	$0'',294$
Groombridge 1830	$7'',025/\text{an}$	$1'',08 \pm 0'',05$ $0'',226 \pm 0'',141$ $0'',183 \pm 0'',019$ $0'',034 \pm 0'',029$	Faye Peters Wichmann Struve	$7'',060/\text{an}$	$0'',109$

Le micromètre d'Arago

Constatant des divergences entre les mesures anciennes des dimensions des planètes, Arago va consacrer dès 1810 beaucoup d'efforts à les remesurer. Il utilise d'abord la lunette de Rochon (figure 3.17), qui donne de l'objet visé une image double dont on peut faire varier à volonté l'écartement en déplaçant longitudinalement le prisme biréfringent qu'elle contient : il suffit alors de faire coïncider le bord interne d'une des images de la planète étudiée avec le bord externe de l'autre image pour mesurer son diamètre, qui est alors égal à l'écartement de ces images^e. Mais Arago s'aperçoit vite que les résultats sont peu reproductibles. Il conçoit alors une variante dans laquelle le prisme biréfringent (le double prisme de Rochon) est placé non pas à l'intérieur d'une lunette mais entre l'œil et l'oculaire. Ce dispositif donne d'un objet astronomique deux images séparées angulairement de l'angle α/g , où α est l'angle entre les deux rayons qui sortent du prisme et g le grossissement de la lunette.

Arago fait d'abord monter en 1814 un double prisme de Rochon derrière un oculaire dont le grossissement g peut varier en déplaçant une des deux lentilles (figure 8.9). Mais ce dispositif présente encore quelques inconvénients, qui disparaissent avec la disposition définitive adoptée vers 1840. Cette fois, les lentilles de l'oculaire

Figure 8.9. Le micromètre à grossissement variable d'Arago. Il s'agit d'un oculaire de lunette dont on peut déplacer une des lentilles de manière à en faire varier le grossissement. Un double prisme biréfringent de Rochon (à gauche) est monté entre cette lentille et l'œil.



^e Voir un exemple dans le petit dessin d'Arago, en bas à gauche de la figure reproduite sous le titre de ce chapitre. Ici, Arago mesure la distance angulaire entre une des bandes de la planète et le bord de celle-ci.

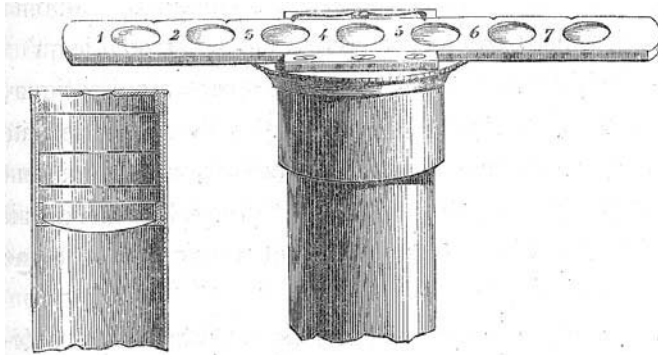


Figure 8.10. Le micromètre oculaire d'Arago. Un prisme biréfringent que l'on peut choisir en faisant coulisser la barrette est interposé entre l'oculaire et l'œil.

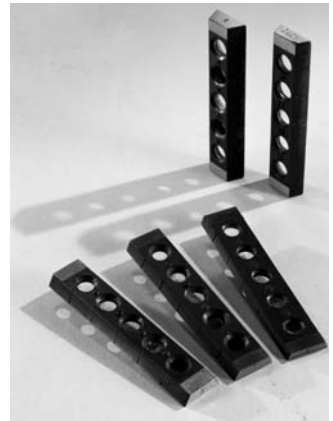


Figure 8.11. Barrettes avec prismes pour le micromètre oculaire d'Arago.



Figure 8.12. Prismes biréfringents pour le micromètre oculaire d'Arago.

sont fixes, donc son grossissement, mais on dispose entre l'œil et l'oculaire un des prismes d'une série, que l'on peut choisir grâce à une coulisse (figure 8.10). On peut ainsi obtenir différentes séparations entre les deux images, de façon précise et parfaitement reproductible puisque le grossissement est fixé. Les collections de l'Observatoire contiennent de nombreux petits prismes de Rochon d'angles variés, construits par Soleil, dont certains sont encore montés sur des barrettes coulissantes (figure 8.11 et figure 8.12). Comme avec la lunette de Rochon, on essaye en choisissant le prisme de faire coïncider les bords des deux images. Si l'on n'y parvient pas exactement, on peut interpoler entre les séparations données par deux prismes. Il est bien entendu possible, en orientant la coulisse, de mesurer le diamètre de la planète dans différentes directions.

Les registres de l'Observatoire sont remplis de mesures micrométriques d'Arago, principalement réalisées avec l'oculaire à grossissement variable ; il n'y a que peu de mesures après 1840, et elles sont souvent faites par Laugier car Arago ne peut plus observer. Ces observations concernent le diamètre et l'aplatissement des planètes, le diamètre des anneaux de Saturne, etc.¹⁸ Ce sont de bonnes mesures qui sortent de l'ordinaire de l'Observatoire, mais elles sont moins bonnes que celles que font à la même époque les observatoires d'Angleterre, d'Allemagne et de Russie, qui sont équipés de lunettes de plus grand diamètre et d'héliomètres qui valent bien les micromètres d'Arago. De plus, elles ne seront jamais réduites et donc jamais utilisées. Mais laissons tout cela pour aborder des résultats plus intéressants.

La polarisation de la lumière et la nature des astres

Nous nous souvenons que, tout de suite après la découverte de la polarisation de la lumière par Malus, Arago s’y est fortement intéressé et qu’il a lui-même découvert la polarisation rotatoire chromatique produite par des lames cristallines de quartz taillées perpendiculairement à l’axe optique (voir le chapitre 3). Utilisant cette propriété, il a conçu un polariscope qui permet de détecter facilement la polarisation linéaire de la lumière (figure 3.21 et figure 3.22) : les deux images données d’un objet par cet instrument sont colorées de couleurs complémentaires si la lumière incidente est polarisée, et restent incolore si elle ne l’est pas. Le polariscope peut se transformer aisément en polarimètre pour mesurer le taux de polarisation. Il est bien naturel qu’il braque cet instrument vers différents astres pour essayer de détecter et de mesurer la polarisation de leur lumière.

La Lune

En octobre 1811, Arago découvre le premier phénomène de polarisation hors de la Terre, en observant avec son polariscope la lumière solaire réfléchiée par la Lune. Ses observations sont reportées en détail dans *l’Astronomie populaire*¹⁹. L’explication qui nous paraît aujourd’hui évidente — la polarisation est due à la réflexion vitreuse sur le sol lunaire — ne l’est curieusement pas pour Arago, qui écrit :

« La lumière de la Lune est polarisée surtout, il m’a semblé, à l’époque du premier quartier. Cette époque est aussi celle où la polarisation d’une lumière réfléchiée par une atmosphère semblable à l’atmosphère terrestre serait un maximum, si une telle atmosphère existait autour de la Lune. En attribuant la majeure partie de la polarisation observée à une atmosphère lunaire, on expliquerait naturellement comment cette polarisation paraît à son maximum dans la direction des taches noires lunaires. »

Pour que la polarisation soit due à une atmosphère (Arago sait que c’est possible puisqu’il a découvert la polarisation du ciel bleu, due à la diffusion de la lumière solaire par l’atmosphère terrestre), il faudrait que celle-ci soit assez épaisse, comme celle de la Terre. Or Arago semble persuadé par ailleurs que si la Lune a une

atmosphère, elle est très ténue : il écrit sur ce sujet pas moins de 8 pages dans l’Astronomie populaire²⁰ (figure 8.13). Il y a là une contradiction flagrante que nous ne comprenons pas. Par ailleurs, Arago écrit dans d’autres textes que la surface de la Lune est solide, et que les mers lunaires ... ne sont pas des mers, et il sait bien que la lumière réfléchie par des solides est polarisée. Notons en passant que les astronomes de l’époque sont persuadés que les cratères lunaires sont volcaniques, et qu’ils pensent que l’explosion brutale de ces volcans éjecte une partie de la croûte lunaire, dont les fragments qui tombent sur la Terre sont les aérolithes²¹. Ce n’est que bien plus tard que l’on a compris que les cratères résultent de l’impact d’astéroïdes sur la Lune, dont la chute a été très fréquente à des époques anciennes.

Les mesures de la polarisation de la Lune et des planètes (dont Arago ne semble pas avoir recherché si la

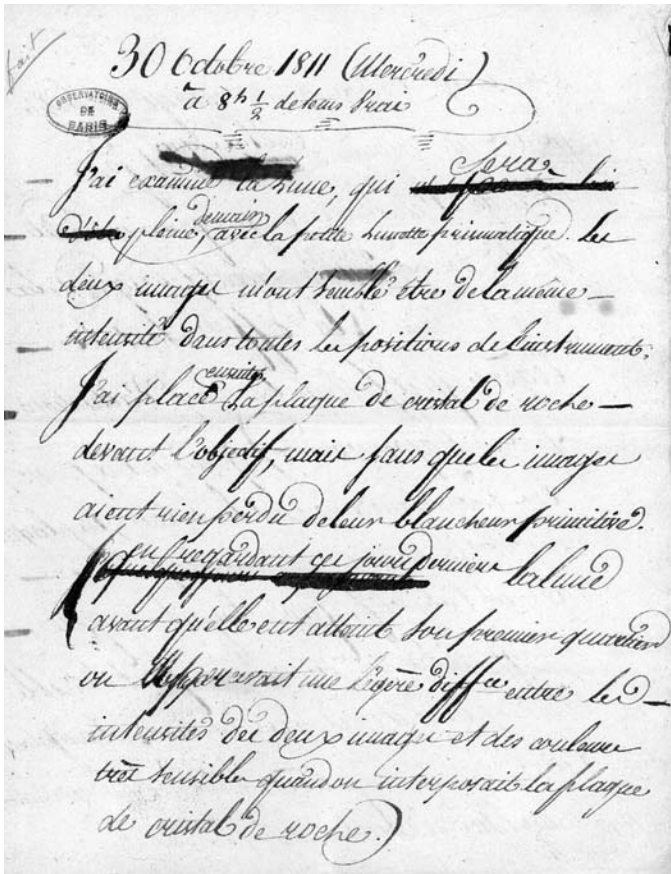


Figure 8.13. La première page d’un brouillon où Arago relate sa découverte de la polarisation de la Lune.

lumière est polarisée) ne seront reprises que vers 1920 par Bernard Lyot. Elles ne nécessitent pas de moyens importants (Lyot utilisait une lunette de 17,5 cm de diamètre), et elles auraient pu être réalisées à l'époque d'Arago avec quelques perfectionnements de son polarimètre. Encore une occasion manquée par manque de persévérance !

Le Soleil

Toujours en 1811, Arago constate, d'abord avec une lame mince de mica suivie d'un cristal de spath d'Islande, puis avec son polariscope, que, contrairement à la Lune, le disque solaire ne présente aucune trace de polarisation, même sur les bords : cela lui permet de conclure que la surface du Soleil est faite d'un gaz émissif, qui est évidemment à très haute température. Le résumé d'une communication faite par Arago devant l'Académie des sciences le 14 juin 1824 explique sa démarche²² :

« M. Arago rend compte des expériences qu'il a faites, il y a déjà très-longtemps, sur la lumière qui émane des corps incandescens. Il a reconnu que cette lumière, si les corps sont solides et liquides, est partiellement polarisée par réfraction quand les rayons forment avec la surface de sortie un angle d'un petit nombre de degrés. Quant à la lumière des gaz enflammés, elle ne présente, sous aucune inclinaison, des traces de polarisation sensibles. M. Arago tire de ces expériences la conséquence qu'une portion notable de la lumière qui nous fait voir les corps incandescents, se forme dans leur intérieur et jusqu'à des profondeurs qu'il n'a pas encore complètement déterminées. Il montre, dès à présent, que le même moyen d'observation peut être appliqué à l'étude de la constitution physique du soleil : les résultats qu'il a déjà obtenus dans cette recherche confirment les conjectures de Bode, de Schroëter [Schröter], d'Herschel, etc. »

On ne saurait sous-estimer l'importance de cette découverte, qui est sans doute, avec celle de la polarisation rotatoire chromatique, la plus marquante de celles d'Arago^f : c'est la première fois, en effet, que l'on peut dire quelque chose sur la nature d'un astre par une

^f Il en est lui-même conscient, car il cite fièrement sa découverte dans sa « *Table chronologique des principales découvertes astronomiques* » insérée à la fin de *l'Astronomie populaire*.

observation à distance (même la nature de la surface de la Lune est alors controversée). Selon le mot de l'astronome Félix Tisserand²³, Arago introduit ainsi « *la physique dans l'Astronomie* », fondant une discipline dont le nom n'apparaîtra que plus tard : l'astrophysique. Pourtant, les historiens des sciences ne font souvent naître l'astrophysique qu'en 1860, date à laquelle les allemands Gustav Kirchhoff et Robert Bunsen montrent, grâce à la spectroscopie, que le Soleil contient plusieurs des éléments chimiques que l'on trouve sur la Terre.

Comme le dit Arago, beaucoup d'astronomes comme Bode, Schröter ou Michell soupçonnaient déjà que le Soleil pouvait avoir une atmosphère gazeuse. Parmi les nombreux modèles qui ont été proposés pour rendre compte des propriétés du Soleil²⁴, nous mentionnerons celui de William Herschel (1795), qu'Arago connaît bien et dont il considère qu'il est « *presque généralement admis aujourd'hui* ». Herschel²⁵ pense que le Soleil est entouré d'une atmosphère gazeuse, étendue et transparente, dont certaines parties sont lumineuses à la suite de « *décompositions [réactions] chimiques* ». Les taches correspondent à des endroits où l'atmosphère n'est pas lumineuse et laisse voir le « *corps opaque* » et sombre du Soleil. En revanche, les facules, qui sont des régions plus brillantes que le reste du disque solaire, correspondent à une accumulation de « *fluides* » dont la « *décomposition* » donne la lumière. Certaines taches qui persistent longtemps sont considérées par Herschel comme des montagnes qui percent l'atmosphère lumineuse, ce qui l'autorise à penser que le corps du Soleil possède des montagnes et des vallées. Finalement, il conclut que le Soleil « *n'est pas autre chose qu'une très grosse planète lumineuse* », qui est « *très probablement habitée, comme le reste des planètes, par des êtres vivants dont les organes sont adaptés aux circonstances particulières de ce vaste globe* ». Bien sûr, la haute température de l'atmosphère est un problème pour la vie, mais Herschel le balaye d'un revers de main en faisant une analogie avec les hautes montagnes terrestres, qui sont très froides bien qu'elles ne soient pas protégées du rayonnement solaire par des nuages : il prétend que l'échauffement du sol n'est possible que si sa matière se prête à une « *combinaison chimique* » avec la chaleur qui la frappe ! Pourtant, pour Herschel, le sol du Soleil n'est pas vraiment sombre. Un peu plus tard, il estimera la brillance des différentes régions : si la brillance du disque solaire est 1000, celle

de la pénombre qui entoure des taches est 469 et celle du noyau des taches, donc du sol, 7⁸. Ainsi, comme le dit Arago en exposant ces résultats « *tous les noyaux des taches, quelque noirs qu'ils paraissent sur le Soleil, éblouiraient par leur très-vive lumière ceux qui les verraient séparément* »²⁶. Mais cela ne paraît poser de problème ni à Herschel, ni à Arago quant à l'habitabilité du Soleil.

Arago reprend en grande partie à son compte les idées d'Herschel pour produire le modèle représenté figure 8.14, qui diffère un peu de ce que nous venons de décrire. Pour lui, il y a deux couches dans l'atmosphère du Soleil : une couche supérieure brillante qu'il nomme photosphère (le nom est resté), et une couche inférieure moins brillante, qui n'est peut-être illuminée que par réflexion. Les trous dans la couche supérieure permettent de voir l'atmosphère inférieure, et correspondent à la pénombre qui entoure les taches solaires ; s'il y a aussi un trou dans cette atmosphère inférieure, on voit le corps encore plus sombre du Soleil, ce qui correspond au noyau de la tache.

Les conclusions d'Arago sur la nature gazeuse de la photosphère solaire n'ont pas convaincu tous ses contemporains : en effet, il écrit dans une notice de 1851²⁷ :

« *L'hypothèse dont je viens de parler sur la constitution physique du Soleil rend un compte très-satisfaisant des faits. Cependant elle n'est pas généralement adoptée : des ouvrages qui font autorité représentaient naguère les taches comme des scories flottant à la surface liquide de l'astre et sorties de volcans solaires, dont nous ne trouverions qu'une faible image dans les volcans terrestres.* »

Certains manuels d'astronomie contemporains, comme celui d'Étienne-Marin Bailly paru en 1830, font bien un compte rendu correct de la découverte d'Arago²⁸. Mais ce n'est pas le cas d'un traité anonyme de 1823 traduit de l'anglais²⁹, ni du manuel d'astronomie de 1853 de John Herschel, qui n'en parlent pas du tout³⁰. Cette découverte sera souvent oubliée, par exemple par Camille Flammarion pour qui le Soleil est tantôt « *un globe de feu liquide* »³¹, tantôt plutôt gazeux³². Pourtant Flammarion avait une grande admiration pour Arago, au point de lui emprunter le titre de son *Astronomie populaire*, qu'il a dédié à sa mémoire.

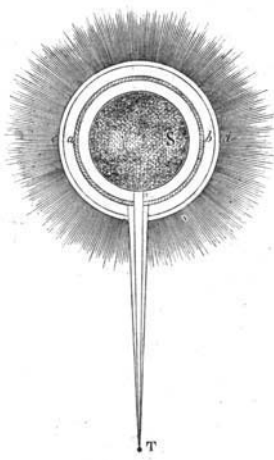


Figure 8.14. Le modèle du Soleil d'Arago. Un trou dans la photosphère brillante permet de voir une couche plus profonde, moins brillante, qui est la pénombre d'une tache. Un deuxième trou dans cette couche dévoile la tache elle-même, qui est une partie du corps sombre du Soleil.

⁸ Ces estimations sont assez bonnes, compte tenu des moyens rudimentaires utilisés par Herschel.

Les éclipses totales de Soleil

Dans sa notice de 1851 sur la constitution physique du Soleil et des étoiles (cf. note 25), Arago écrit :

« Nous devons naturellement nous demander [...] si la photosphère finit brusquement et sans être entourée d'une atmosphère gazeuse peu lumineuse par elle-même, ou faiblement réfléchissante. Cette troisième atmosphère disparaîtrait ordinairement dans l'océan de lumière dont le Soleil paraît toujours entouré. [...] Un moyen se présentait pour lever ce doute, c'était de choisir le moment où, dans une éclipse totale, la Lune couvre complètement le Soleil. [...] On sait maintenant que ce fut l'objet principal que se proposèrent les astronomes qui, en 1842, se rendirent dans le midi de la France, en Italie, en Allemagne, en Russie, où l'éclipse de Soleil du 8 juillet devait être totale. [...] Les observateurs furent étrangement surpris lorsque [...] ils virent quelques protubérances rosacées de 2 à 3 minutes de hauteur, s'élançant pour ainsi dire du contour de notre satellite [voir la figure 8.15]. »

Arago avait préparé des instructions pour l'éclipse de 1842³³, et avait lui-même participé aux observations à Perpignan. Ce n'était certainement pas la première fois que l'on voyait des protubérances, mais elle n'avaient pas jusque là fait l'objet de beaucoup d'attention. Arago estime que ces protubérances sont « des nuages solaires nageant dans une atmosphère gazeuse », une conclusion confirmée par des observations lors de l'éclipse totale du 8 août 1850 et surtout pendant celle du 28 juillet 1851, observée à Danzig par Mauvais et Goujon, qui voient « une tache rougeâtre [...] séparée du bord de la Lune » (figure 8.15). Babinet imagine en 1846 que ces « nuages ignés », qu'il appelle aussi « masses planétaires gazeuses incandescentes », se soutiennent par la force centrifuge en tournant autour du Soleil³⁴ ; mais ils devraient alors être animés d'une très grande vitesse alors que l'aspect des protubérances ne change que lentement et que leur hauteur varie. C'est pourquoi Arago conclut à la nécessité d'une nouvelle atmosphère capable de supporter ces nuages³⁵,

« une troisième atmosphère diaphane, rendue manifeste par les couronnes lumineuses et les protubérances détachées de la surface solaire qu'on aperçoit pendant les éclipses totales de l'astre radieux. La possibilité de l'existence de cette troisième atmosphère a été dédaigneusement rejetée par

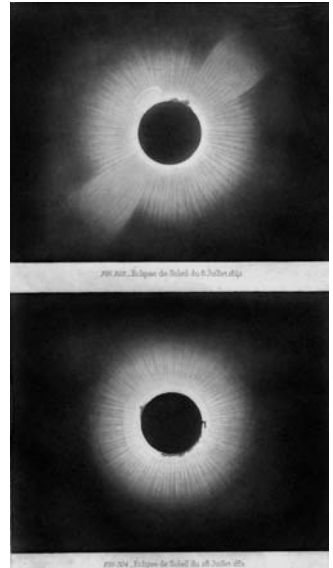


Figure 8.15. Dessins du Soleil pendant l'éclipse totale du 8 juillet 1842 (en haut) et du 28 juillet 1851. Remarquer les protubérances qui entourent le disque noir de la Lune et se détachent sur la couronne.

un membre de l'Académie, d'après des motifs qui ne me paraissent avoir aucune valeur. L'académicien en question parle de comètes qui ont passé librement dans la région circum-solaire où les protubérances apparaissent pendant les éclipses. »

Cette atmosphère serait-elle ce que nous appelons aujourd'hui la couronne solaire ? Depuis longtemps, on avait remarqué pendant les éclipses totales de Soleil par la Lune que celle-ci était entourée d'une couronne lumineuse. Mais « *est-elle un objet réel, est-elle l'atmosphère du Soleil, ou bien doit-on l'attribuer, comme quelques personnes l'ont pensé, à des effets de diffraction [...] au voisinage de la Lune ou à quelque chose d'équivalent ?* »³⁶ On s'échine à essayer de déterminer si cette couronne est centrée sur le Soleil ou sur la Lune, mais l'irrégularité de la couronne et le faible décalage qu'il y a entre le Soleil et la Lune pendant la totalité de l'éclipse rendent ces tentatives infructueuses. Après une longue discussion, Arago conclut :

« Il est possible, en définitive, que la lumière de la couronne blanchâtre soit le résultat de la superposition de la lumière provenant d'une atmosphère diaphane dont la photosphère solaire serait entourée, et de celle d'une couronne artificielle formée par voie de diffraction. »

La polarisation devrait aider à résoudre la question. En effet, la polarisation ne peut provenir de la diffraction, mais implique nécessairement une réflexion de la lumière solaire par un constituant de la couronne. Arago avait demandé aux astronomes de détecter la polarisation éventuelle de la couronne lors de l'éclipse de 1842, mais seuls d'Abbadie d'un côté, et Arago et Mauvais de l'autre, l'ont observée. On ne peut rien en conclure de très clair. On ne tirera rien non plus de l'éclipse de 1851. Il faudra attendre longtemps pour savoir que la couronne appartient bien au Soleil, qu'elle est faite d'un gaz très chaud mais qu'elle contient aussi des poussières responsables de sa polarisation.

En conclusion de ses travaux sur le Soleil, Arago écrit avec une satisfaction un peu naïve :

« Je me suis efforcé, dans le cadre qui m'était assigné d'avance, de tracer l'esquisse de tout ce que nous savons aujourd'hui relativement au volume, à la distance et à la constitution physique du globe immense qui nous éclaire. Cette esquisse, dans ses bornes circonscrites, suffira pour

détromper les personnes qui avaient cru devoir mettre en question l'importance et la certitude des résultats obtenus par les observateurs modernes. Elles reconnaîtront, si elles sont de bonne foi, que, dans l'histoire du progrès de nos connaissances, progrès qui sera sans doute indéfini, les travaux des astronomes du XIX^e siècle ne passeront pas inaperçus. Quant à des critiques qui n'auraient point été inspirées par l'amour de la vérité, elles ne mériteraient pas de fixer un instant l'attention de cette assemblée, et je pense que je pourrais moi-même les dédaigner. »

Les étoiles

À la fin de sa vie, on ne sait pas exactement à quelle date, Arago s'attaque à la polarisation de la lumière des étoiles, dans le but de déterminer la nature de leur surface comme il l'avait fait pour le Soleil. Les résultats n'occupent que quelques pages de son sixième mémoire sur la photométrie (voir plus loin). Il remarque que, comme celle du Soleil, la lumière des étoiles qu'il a observées n'est pas polarisée. Mais ceci n'implique rien sur leur nature, car par raison de symétrie une étoile sphérique n'est pas polarisée, même si elle est solide ou liquide. Il faut donc trouver des cas où cette symétrie est rompue. Remarquant qu'il existe des étoiles très fortement variables de façon périodique (par exemple Algol = β Persei), Arago indique qu'il n'y a que trois possibilités pour expliquer leurs variations : soit une portion considérable du disque de l'étoile est moins brillant que le reste et l'étoile est en rotation, soit l'étoile possède un compagnon moins brillant qui occulte périodiquement son disque, soit l'étoile est de forme très aplatie et ne tourne pas autour de son petit axe^h. Dans les trois cas, il y a rupture de symétrie pendant une partie du cycle, et quelle que soit l'origine des variations l'étoile observée est forcément gazeuse si elle n'est pas polarisée. Or :

« L'observation attentive de plusieurs étoiles changeantes faite avec la lunette polariscopique dans toutes les parties de

^h Les trois cas existent dans la nature, mais ce sont des étoiles doubles à éclipses qui ont été observées à la demande d'Arago. Certaines étoiles particulières ont une polarisation intrinsèque, due à leur champ magnétique très élevé, mais elles n'étaient pas connues à l'époque.

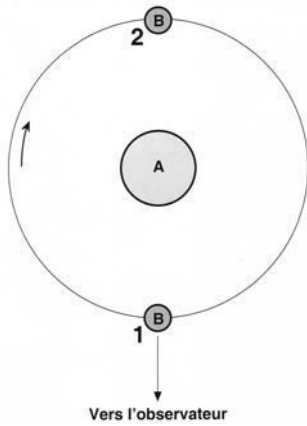


Figure 8.16. Schéma du système d'Algol. La petite composante B tourne autour de la composante principale A, dont la luminance est plus bien plus grande. Son passage devant A (position 1) produit une diminution d'éclat assez grande, tandis que lorsqu'elle passe derrière (position 2) la diminution d'éclat est faible (voir la figure 8.17). Si T est la période de révolution, le temps que met apparemment B pour aller de 1 en 2, mesuré par l'observateur, est $T/2 + t$ si t est le temps de propagation de la lumière de 2 en 1, tandis que le temps que l'observateur mesure lorsque B va de 2 en 1 est $T/2 - t$.

leurs phases, a démontré que leur lumière reste constamment d'une blancheur parfaite [donc n'est pas polarisée puisque la polarisation se traduit par des couleurs dans le polariscope]. On peut donc assurer que cette lumière émane d'une substance analogue à nos nuages [qui ne sont pas polarisés car formés de gouttes d'eau bien plus grosses que la longueur d'onde] ou à nos gaz enflammés. [...] On voit qu'il résulte de ces recherches, qui devront être continuées, la confirmation complète de l'hypothèse de l'identité de notre Soleil avec les innombrables étoiles qui peuplent le firmament. »

Le raisonnement est astucieux, et Arago a clairement perçu l'importance du résultat. Il est dommage qu'il n'ait été publié que dans ses *Cœuvres complètes* ; mais de toute façon l'heure n'est pas encore à l'astrophysique.

En 1949, l'américain William Albert Hiltner découvrira la polarisation de certaines étoiles, et comprendra qu'elle n'est pas intrinsèque, mais due aux poussières interstellaires interposées, orientées par le champ magnétique galactique. De telles observations n'auraient pas abouti avec l'instrumentation disponible du temps d'Arago, et quoi qu'il en soit on n'aurait pas pu comprendre alors l'origine de cette polarisation.

Dans son éloge d'Herschel, Arago tire d'autres conclusions intéressantes de son étude des étoiles variables. Il déduit fort judicieusement de l'absence de variations de couleur de ces étoiles que la lumière des différentes couleurs (donc aux différentes longueurs d'onde) se propage à la même vitesse :

« Les rayons des différentes couleurs se meuvent avec la même vitesse. [...] Depuis qu'il me vint à la pensée que les étoiles variables seraient un moyen de trancher la question, si controversée, de l'égalité ou de l'inégalité de vitesse des rayons lumineux de diverses couleurs, j'ai souvent examiné des étoiles périodiques blanches dans tous leurs degrés d'intensité, sans y remarquer de coloration appréciable. Je me suis assuré en outre, qu'aucun des astronomes modernes voués à ce genre de recherches, n'a mentionné de colorations réelles dans les phases d'une étoile périodique quelconque. Les témoignages sont d'autant plus précieux qu'en faisant leurs observations, Maraldi, Herschel, Goodricke, Pigott, etc., ne songeaient nullement au parti qu'on pourrait en tirer pour résoudre les questions relatives à la vitesse de la lumière des différents rayons du spectre. »

Ici on retrouve l'intérêt d'Arago pour la vitesse de la lumière. Mais il déduit de sa constatation une autre conclusion qui peut nous paraître plus surprenante, bien qu'elle soit logique :

« *Les espaces célestes, tout le monde en convient, sont remplis d'une matière très-rare [raréfiée]. [...] La densité de [cette] matière, [...] ne saurait dépasser une limite dont les observations des étoiles changeantes peuvent assigner la valeur.* »

Arago assimile en effet à un gaz cette matière interstellaire (dont on comprend par d'autres textes qu'il s'agit pour lui de l'éther). Or il sait, pour l'avoir étudié au laboratoire, que les gaz dispersent la lumière, donc que la vitesse de la lumière y dépend de la longueur d'onde. Le fait qu'il n'observe pas cette dépendance fournit donc une limite supérieure, qu'il se garde bien de préciser numériquement, à la densité de la matière traversée : c'est une autre idée astucieuse, mais qui ne trouvera que depuis 1950 une application à la propagation des ondes radio dans le milieu interstellaire ionisé.

Enfin Arago assure qu'« *une observation attentive des phases d'Algol, pourra servir à déterminer directement la vitesse de la lumière de cette étoile.* » Cette idée est explicitée dans *l'Astronomie populaire*³⁷. Algol (β Persei) est une étoile double à éclipses, dont l'une des composantes, plus petite et plus froide que l'autre, passe alternativement devant et derrière la composante principale avec une période de 2 jours, 20 heures et 49 minutes (figure 8.16). Ces éclipses occasionnent une diminution d'éclat de l'ensemble, plus importante lorsque le compagnon passe devant que lorsqu'il passe derrière (figure 8.17). Le compagnon s'éloigne évidemment de nous en parcourant une moitié de son orbite (supposée circulaire pour simplifier), puis se rapproche pendant l'autre moitié. Comme l'explique la légende de la figure 8.16, la première partie du trajet dure plus longtemps que la seconde, vue de la Terre, en raison de la vitesse finie de la lumière (ceci rappelle l'observation des éclipses des satellites de Jupiter qui a permis de découvrir cette vitesse finie de la lumière : voir le chapitre 4). Si l'on arrive à mesurer cette différence, qui doit se traduire par une petite asymétrie dans la courbe de lumière du système (figure 8.17), on peut en principe obtenir le temps que met la lumière à parcourir le diamètre de l'orbite, après avoir corrigé les

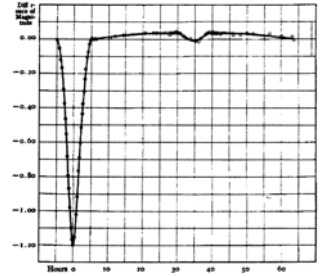


Figure 8.17. Variations d'éclat d'Algol au cours de sa période, mesurées par Joël Stebbins en 1921. L'éclat relatif, qui varie d'un peu plus de 1,20 magnitude, est porté en ordonnées en fonction de la phase. Le minimum profond correspond à l'éclipse partielle de la composante principale par le compagnon, et le petit minimum à l'éclipse totale de ce compagnon par la composante principale.



Figure 8.18. Divers aspects du noyau et de la chevelure de la comète de Halley, vus par John Herschel. Il est curieux que les nombreux dessins de comètes que l'on trouve dans l'*Astronomie populaire* proviennent tous d'astronomes étrangers.

mesures de l'effet du déplacement de la Terre sur sa propre orbite pendant l'observation. Puis, si l'on parvient à mesurer la distance d'Algol, on peut espérer avoir le diamètre de l'orbite, donc la vitesse de la lumière. Malgré l'optimisme d'Arago, cette détermination n'est guère possible avec quelque précision, même avec les données actuelles, car Algol est en fait un système triple dont les propriétés sont très complexes. Ce que l'on peut retenir de cette histoire, c'est l'imagination d'Arago et surtout sa motivation : comme lors de ses observations de 1806-1811 (chapitre 4), il veut savoir si la vitesse de la lumière dépend de la nature de sa source.

Les comètes

L'étude des comètes est un des principaux sujets de l'astronomie du début du XIX^e siècle (figure 8.18). Arago leur consacre 224 pages de son *Astronomie populaire*³⁸. Bien sûr, il s'agit surtout d'en calculer les orbites et d'introduire dans ce calcul les perturbations apportées par l'attraction des planètes : l'accord entre le calcul et l'observation est un triomphe de la mécanique céleste. Son apogée est la prédiction par Encke du retour d'une nouvelle comète de très courte période (3 ans et 108 jours) découverte en 1819 par Pons à Marseille, mais à laquelle on donne le nom d'Encke lorsqu'elle réapparaît. Cependant, les passages de cette comète au plus près du Soleil (au périhélie) semblent toujours se faire avec un peu d'avance, et Bessel en déduit en 1835 la présence de matière diffuse issue du Soleil, dont on va beaucoup discuter à l'époque. Nous savons aujourd'hui qu'une telle matière existe réellement (c'est le vent solaire), mais que sa densité est bien trop faible pour affecter le mouvement des comètes : l'avance constatée résulte de petites erreurs d'observation et de calcul.

On s'intéresse aussi à la chute possible d'une comète sur la Terre : c'est une peur ancestrale qui subsiste aujourd'hui, surtout aux États-Unis. Arago se veut rassurant en calculant que la probabilité d'un tel évènement est extrêmement faible³⁹. Mais il se pose lui-même la question avec acuité et probablement même avec quelque inquiétude, car il écrit beaucoup d'autres textes sur des sujets voisins : « *Trouve-t-on quelque raison de supposer que des comètes soient jamais tombées dans le Soleil ?* » ;

« Des comètes sont-elles tombées dans les étoiles ? » ; « La Terre peut-elle passer dans la queue d'une comète ? Quelles seraient, sur notre globe, les conséquences d'un pareil évènement ? » ; « Le brouillard sec [?] de 1783 et celui de 1831 ont-ils été occasionnés par des queues de comètes ? » ; « La Terre pourra-t-elle jamais devenir le satellite d'une comète, et, dans le cas de l'affirmative, quel serait le sort de ses habitants ? » ; « Le déluge a-t-il été occasionné par une comète ? » ; « La Lune a-t-elle jamais été heurtée par une comète ? » ; « La Lune a-t-elle été une comète ? » ; « Les comètes peuvent-elles modifier sensiblement le cours des saisons ? »⁴⁰. On se pose même la question de l'habitabilité des comètes, comme de celle du Soleil et des planètes. Les réponses d'Arago sont généralement pleines de bon sens, mais il n'est pas du tout sûr qu'il ait réussi à convaincre ses contemporains.

Plus intéressantes pour le scientifique sont les recherches sur la nature physique des comètes, qui commencent à être actives du temps d'Arago. Le 3 juillet 1819, celui-ci découvre la polarisation de la lumière de la queue d'une comète, et en conclut fort correctement que cette lumière est de la lumière solaire diffusée par les poussières formant cette queue⁴¹ :

« Les épreuves, répétées un grand nombre de fois avec trois prismes [de Rochon] différents, indiquèrent toutes uniformément l'espèce de polarisation que la lumière solaire aurait éprouvée en se réfléchissant sur la queue de la comète. MM. De Humboldt, Bouvard, Mathieu et voulurent bien prendre part à ces expériences, et arrivèrent aussi, de leur côté, au résultat précédent. [...] Si je ne savais combien il faut se défier des observations photométriques, [...] je dirais que les expériences précédentes prouvent que la comète n'était pas lumineuse par elle-même, et qu'elle réfléchissait les rayons du soleil ; mais je me contenterai de présenter aujourd'hui ce résultat comme une simple probabilité. »

Ces observations sont refaites sur différentes comètes. Le 23 octobre 1835, Arago observe, de façon très claire cette fois, « de la polarisation sur la lumière de la comète de Halley, observation confirmée par [Alexis] Bouvard, Mathieu et Eugène Bouvard, élève astronome à l'Observatoire »⁴². Néanmoins, la nature de la queue des comètes restera longtemps incertaine, d'autant plus que la morphologie de ces astres est extrêmement variable. Arago et ses contemporains comprennent bien que de la matière est éjectée du noyau sous l'influence de la chaleur solaire,

et Arago s'emploie à montrer, par un raisonnement photométrique un peu discutable, que la disparition des comètes est liée à leur éloignement du Soleil. De son côté, Bessel postule en 1836 que l'éjection de la matière cométaire se fait du côté du Soleil, puis qu'une force répulsive de nature inconnue la force à se diriger dans la direction opposée, formant ainsi la queue⁴³.

En dehors de ces quelques résultats, l'étude physique des comètes devra attendre la fin du siècle⁴⁴. La spectroscopie montrera que la queue contient non seulement des poussières, mais aussi du gaz. En 1900, la force répulsive qui agit sur les poussières sera identifiée à la pression de radiation de la lumière du Soleil par Svante Arrhenius : une vieille idée, mais qui reposera désormais sur une base physique solideⁱ. Ce n'est qu'en 1951 que l'allemand Ludwig Biermann comprendra que, de son côté, le gaz éjecté par le noyau est entraîné par le vent émis continuellement par le Soleil. La trajectoire du vent, canalisé par le champ magnétique issu du Soleil, n'est pas radiale mais s'enroule en spirale, si bien que la queue gazeuse des comètes a une direction différente de la queue de poussières, qui est exactement à l'opposé du Soleil. Ainsi s'explique la morphologie apparente des comètes, qui dépend de l'angle sous lequel on les voit. Le petit noyau solide (une dizaine de kilomètres) d'une comète, celui de la comète de Halley, sera vu pour la première fois en 1986 par la sonde européenne Giotto ; ce qu'on croyait auparavant être ce noyau n'était que son enveloppe gazeuse beaucoup plus étendue.

De nos jours, les comètes suscitent un renouveau d'intérêt, car ce sont des échantillons presque intacts de la matière du Système solaire primitif, conservés à grande distance du Soleil dans le nuage de comètes postulé par le hollandais Jan Hendrik Oort : les comètes s'en échappent de temps à autre, sous l'influence de perturbations gravitationnelles, pour venir visiter l'intérieur du système solaire où certaines s'évaporent complètement après y avoir séjourné quelque temps.

ⁱ Arago s'est lui-même intéressé à cette idée, mais considérait que les preuves expérimentales de la pression de radiation n'étaient pas concluantes. Il pensait avec raison qu'il faudrait refaire des expériences dans le vide avec une balance de torsion (OC t. 7, p. 447-454).

La photométrie

La photométrie est l'art de mesurer l'intensité de la lumière. Elle occupe une partie importante de l'activité scientifique tardive d'Arago. Arago attribue l'invention de la photométrie à Pierre Bouguer, astronome français que nous avons rencontré à propos de la mesure d'un arc de méridien au Pérou avec Godin et La Condamine (voir le chapitre 6). Cette attribution est partiellement usurpée, même si les travaux de Bouguer sur la « *gradation de la lumière* »⁴⁵ représentent un progrès notable : il y a eu beaucoup de travaux avant Bouguer, et l'essentiel des principes de la photométrie est dû à Johann Heinrich Lambert, qui a en particulier énoncé la loi de la conservation du flux de lumière depuis l'émetteur jusqu'à l'œil⁴⁶. Quant à Arago, il a inventé de nouvelles méthodes expérimentales utilisant la polarisation et fait construire les instruments correspondants, avec lesquels il a fait des mesures photométriques valables.

Trois étapes successives ont été nécessaires pour atteindre ce but. C'est que l'on ne pouvait par l'observation visuelle, seule possible à l'époque, que comparer des intensités lumineuses égales. Pour comparer deux intensités différentes, tout le problème était d'atténuer la plus forte de façon connue pour qu'elle deviennent égale à l'intensité la plus faible, et c'est ce qu'avaient fait avec plus ou moins de bonheur les prédécesseurs d'Arago. Les étapes de son travail, ainsi que ses résultats, sont décrits dans un texte introductif de 1833 suivi de sept mémoires⁴⁷. Six ont été lus coup sur coup à l'Académie des sciences de mars à juin 1850 : Arago sentait sa santé décliner et voulait y présenter toutes les parties inédites de son œuvre pendant qu'il en avait encore les forces, tout en faisant faire des observations complémentaires par Frédéric Petit, son élève devenu directeur de l'Observatoire de Toulouse, et par Ernest Laugier. Il dit dans le premier mémoire :

« Mes premières expériences photométriques datent de 1815. Je les faisais alors avec un appareil mobile que je tenais à la main [le polarimètre ou une adaptation]. Cependant, telle était la bonté du principe dont je faisais l'application, que plusieurs des résultats obtenus ainsi servoient à Fresnel à vérifier ses formules théoriques. »

Il est dommage que nous n'ayons pas plus de détail sur les expériences photométriques de 1815, qui portaient

probablement sur la réflexion vitreuse^j. Les expériences ultérieures n'en sont sans doute que la reprise avec des appareils plus perfectionnés.

Les trois premiers mémoires exposent les méthodes mises au point par Arago, et les quatre derniers^k donnent les résultats, ainsi que quelques détails supplémentaires sur les méthodes et sur les travaux concernant la polarisation.

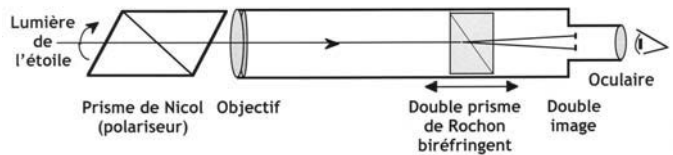
Devenu spécialiste de la polarisation, il est bien naturel qu'Arago l'ait utilisée pour la photométrie : les trois étapes en font usage. Dans son texte introductif, il fait d'ailleurs remarquer qu'il est nécessaire de tenir compte de la polarisation dans les mesures photométriques :

« Lambert et Bouguer ont, l'un et l'autre, soumis les faisceaux lumineux à des réflexions et à des réfractions multiples, sans s'apercevoir qu'après une première réflexion comme après une première réfraction les rayons ont acquis de nouvelles propriétés : ces propriétés singulières qui distinguent la lumière polarisée de la lumière ordinaire, et dont la manifestation devient surtout évidente par des phénomènes d'intensité. »

Dans l'appendice 2, nous décrivons la méthode assez compliquée qui sert de base à l'appareil qu'il va utiliser pour ses observations astronomiques, dont le principe est représenté figure 8.19.

Ayant vérifié la loi du cosinus carré, qui exprime que l'atténuation de la lumière qui traverse un polariseur puis un analyseur est donnée par le carré du cosinus de l'angle

Figure 8.19. L'appareil photométrique d'Arago. C'est une lunette de Rochon, devant l'objectif de laquelle on place un polariseur. Une composante polarisée de la lumière de l'étoile, qui a l'intensité moitié de la lumière totale, entre dans la lunette et passe à travers un double prisme de Rochon qui en donne deux images. On peut changer la séparation de ces deux images, vues dans l'oculaire, en déplaçant longitudinalement le prisme, et faire varier à volonté l'intensité relative des images en faisant tourner sur lui-même le prisme de Nicol d'une quantité connue.



^j À la suite d'un article de Fizeau et Foucault consacré à l'arc électrique et paru en 1844 dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 18, p. 746-754, on trouve la note suivante : « M. Arago a rappelé les expériences, déjà très-anciennes, à l'aide desquelles il compara, par des moyens photométriques directs, la lumière du Soleil et celle des charbons de la pile. »

^k Le sixième, qui n'est pas le moins intéressant, n'a pas été présenté à l'Académie et a été retrouvé par Barral.

entre leurs directions de polarisation (voir l'appendice 2), Arago peut aborder la photométrie proprement dite. Il utilise pour ce faire l'appareil de la figure 8.19. Il s'agit d'une lunette de Rochon (figure 3.17) devant laquelle on place un polariseur, qui est maintenant le prisme inventé en 1828 par le physicien écossais Nicol. Si la lumière reçue est naturelle (non polarisée), ce qui est le cas pour celle qui provient d'une étoile ou du Soleil, on obtient ainsi une composante polarisée qui a la moitié de l'intensité totale. On observe alors cette composante polarisée à travers un analyseur de polarisation, qui peut être un prisme de Rochon comme dans la figure, ou un autre prisme de Nicol. On compare la lumière ainsi atténuée de façon connue grâce à la loi du carré du cosinus à une autre lumière de référence, de manière à les égaliser.

L'assombrissement du bord du disque solaire

Arago s'est d'abord intéressé au problème de l'uniformité du disque solaire. Il en dit au début de son quatrième mémoire :

« De tous les problèmes posés et non résolus qui figurent dans le vaste domaine de l'astronomie physique, il n'en est pas qui intéresse plus directement les hommes que les problèmes relatifs à la constitution physique du Soleil. La solution de presque tous ces problèmes implique plus ou moins l'examen de cette question capitale : les bords et le centre du Soleil sont-ils également lumineux ? »

Il n'est pas le premier à s'attaquer à cette difficile observation. Galilée et Huygens avaient déjà considéré le problème, et Bouguer prétendait que les bords du disque étaient nettement moins lumineux que le centre. Lambert pensait qu'il n'en était rien. Cependant Airy et John Herschel partagent l'opinion de Bouguer. Arago va donc observer le Soleil avec le montage de la figure 8.19, qui lui donne deux images décalées dont il peut faire varier l'écartement en déplaçant longitudinalement le prisme biréfringent de Rochon. Pour tester la sensibilité de sa méthode, il place le bord d'une des images sur le centre de l'autre, puis fait varier l'intensité relative de ces images en faisant tourner sur lui-même le prisme de Nicol. Il constate qu'en partant d'une position où l'on

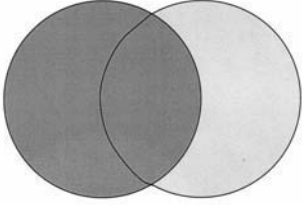


Figure 8.20. Les deux images du Soleil vues dans l'instrument de la figure 8.19.

On règle le polariseur de façon à ce que l'image faible soit juste visible au dessus de l'image forte. Son intensité est alors de l'ordre de $1/40$ de celle de l'image forte.

ne voit qu'une seule image, on commence à voir apparaître l'image faible se projetant sur l'image brillante lorsque sa luminosité est $1/40$ de celle de celle-ci (figure 8.20). Il place ensuite une lame de quartz entre le prisme de Nicol et l'objectif, réalisant ainsi la polarisation rotatoire chromatique. Les deux images du Soleil prennent alors de vives couleurs complémentaires. Leur partie commune, où ces couleurs sont superposées, est alors blanche, mais si le bord du Soleil est plus ou moins brillant que le centre on doit le voir quelque peu coloré dans cette partie commune. Ce n'est pas le cas, et Arago (ou plutôt Laugier qui a dû faire la plupart des observations) évalue donc à moins de $1/40$ la différence des luminances. Assez curieusement, cette limite supérieure est transformée dans *l'Astronomie populaire* en un résultat positif⁴⁸ : « J'ai conclu [de mes expériences] qu'il y a une différence d'intensité entre le bord et le centre égale à $1/40^e$. » Est-ce une erreur de Barral ou un repentir ? Laugier n'a en tout cas pas observé le fort assombrissement rapporté par Bouguer. Il est probable que son observation est fautive, mais c'est difficile de le vérifier car Arago ne précise pas sur quelle largeur du limbe elle porte ; or l'assombrissement est progressif.

Cependant, les daguerréotypes du Soleil donnent un résultat différent. Arago écrit dans son quatrième mémoire sur la photométrie :

« Dès les premiers temps de la publication de la brillante découverte de M. Daguerre, j'ai reconnu, en recevant l'image du Soleil sur une plaque d'argent, que les rayons qui proviennent de la partie centrale du disque du Soleil ont une plus forte action photogénique que ceux qui partent des bords¹. Cette expérience a été répétée plus tard par MM. Fizeau et Foucault, qui ont pris en 1844 et 1845, un grand nombre d'images photographiques du Soleil. »

On voit incontestablement un assombrissement des bords du disque solaire sur ces derniers clichés, et en particulier sur le magnifique daguerréotype conservé au Musée des arts et métiers⁴⁹ : la figure 8.21 est une gravure reproduisant ce daguerréotype. Et Arago écrit dans *l'Astronomie populaire* que ces « deux physiciens très-distingués, MM. Fizeau et Foucault, en recevant, à ma prière, sur des

¹ Il s'agit sans doute du premier daguerréotype du Soleil, peut-être celui pris par Daguerre et Arago à l'occasion de l'éclipse partielle du 15 mars 1839 : voir le chapitre 11.

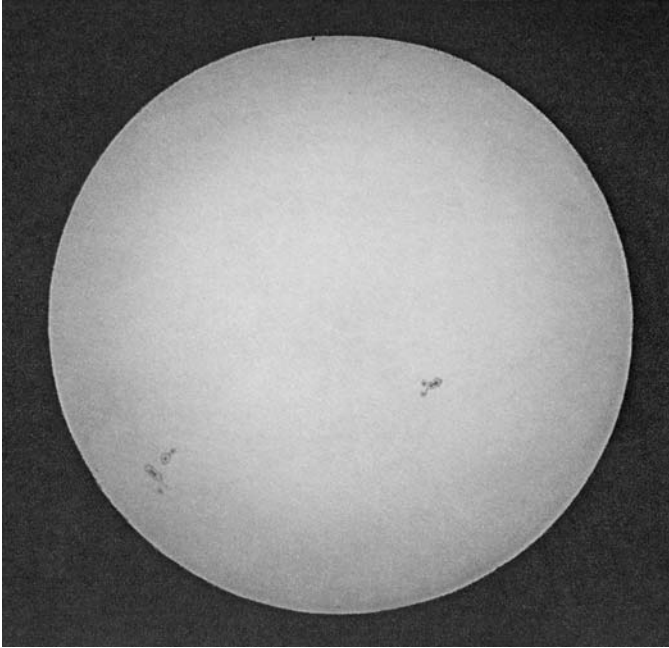


Figure 8.21. Gravure de *l'Astronomie populaire* d'après le daguerréotype du Soleil pris le 2 avril 1845 par Fizeau et Foucault⁵⁰. Les taches et l'assombrissement des bords du disque sont bien visibles. Un contour a été ajouté par le graveur autour de la pénombre des taches.

plaques daguerriennes l'impression très-rapide du disque du Soleil, ont vérifié par la photographie les résultats auxquels je suis arrivé par la photométrie », ce qui est pour le moins osé !

Arago dit de l'assombrissement vu sur les daguerréotypes :

« L'intensité de l'action chimique est la plus grande pour les rayons venant du centre, elle est notablement plus faible pour les rayons venant du bord et décroît d'une manière continue pour les rayons intermédiaires. Les faisceaux lumineux donnent, comme on sait, des spectres prismatiques qui présentent des solutions de continuité transversales, des raies entièrement noires [ce sont les raies de Fraunhofer]. Pour compléter l'étude qui vient d'être exposée, il y aura lieu de rechercher si les rayons qui partent du bord et du centre du disque solaire fournissent des spectres dont les raies se correspondent exactement. Il restera enfin à comparer leurs propriétés calorifiques. »

Si la première phrase ne nous apprend rien de nouveau, la suite est plus intéressante. L'idée de faire un spectre en mettant la fente du spectroscopie à travers le Soleil est novatrice ; peut-être Arago regrette-t-il d'avoir dissuadé les astronomes d'utiliser un spectroscopie lors

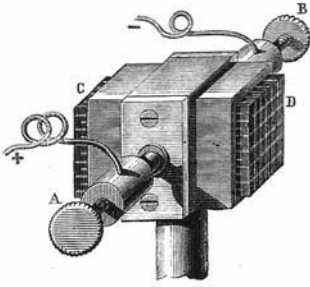


Figure 8.22.

Le thermomultiplicateur de Nobili et Melloni. Il s'agit d'un ensemble de couples thermoélectriques bismuth/antimoine montés en série.

Le courant est mesuré avec un galvanomètre. L'instrument est assez sensible pour détecter le rayonnement d'une main à 1 mètre de distance.

de l'éclipse totale de 1842, sous prétexte qu'il y avait des observations plus intéressantes à faire : il aurait vu que le spectre des protubérances est radicalement différent de celui du disque solaire !

Il avait aussi essayé en vain de détecter l'assombrissement du Soleil dans les « rayons calorifiques », c'est-à-dire dans l'infrarouge proche, en laissant passer l'image du Soleil donnée par la lentille de la méridienne de l'Observatoire devant un thermomètre, et il est naturel qu'il propose de faire une meilleure observation. Celle-ci sera réalisée en 1852 par le père Angelo Secchi avec « un thermomètre particulier, fondé sur l'électricité que produit la chaleur », c'est-à-dire un récepteur fait de nombreux thermocouples en série, inventé par Nobili et connecté vers 1835 à un galvanomètre par Melloni, qui le nomme *thermomultiplicateur* (figure 8.22). Secchi trouve un net assombrissement des bords dans l'infrarouge ; il observe également un assombrissement dans le visible en comparant visuellement entre elles différentes régions du disque projeté sur un écran⁵¹.

Les mesures modernes confirment que l'assombrissement dépend de la longueur d'onde, et est moins marqué dans le visible et dans l'infrarouge que dans l'ultraviolet, où le daguerréotype a son maximum de sensibilité.

Arago n'essaye pas d'expliquer l'assombrissement des bords solaires. Secchi suppose que la photosphère, dont la nature est peu claire pour lui, est entourée d'une atmosphère absorbante, qui obscurcit davantage les bords que le centre du Soleil puisqu'on y traverse une plus grande épaisseur, et qui s'accumule en certains endroits pour former les taches. La spectroscopie tend à conforter son modèle, puisqu'on ne voit dans le spectre du Soleil que des raies d'absorption. Il va jusqu'à proposer qu'une très grande partie du rayonnement du Soleil est absorbée par cette couche : ceci nous choque aujourd'hui puisqu'il n'y a pas alors conservation de l'énergie, mais posait peut-être moins de problème à l'époque. De son côté, Arago explique que les facules sont plus brillantes dans les régions extérieures du disque qu'au centre par le fait que l'on traverse une plus grande épaisseur de gaz incandescent émetteur si on l'observe obliquement. Ces deux idées peuvent paraître contradictoires, et l'on comprend que les contemporains s'y soient perdus.

Il faudra beaucoup de temps pour éclaircir la situation et construire des modèles réalistes de l'atmosphère

solaire : ce sera l'œuvre de l'allemand Karl Schwarzschild et de ses successeurs à partir de 1906. Nous savons aujourd'hui que l'atmosphère gazeuse du Soleil est plus chaude vers l'intérieur. Elle émet de la lumière dans toute son épaisseur et n'est que partiellement transparente : le rayonnement des couches profondes est donc partiellement absorbé par les couches plus superficielles^m. La lumière que nous recevons vient principalement de la couche où l'opacité vue de l'observateur devient importante. Cette région est plus superficielle, donc moins chaude et moins lumineuse, au bord qu'au centre du Soleil car on la voit obliquement, et non perpendiculairement comme au centre du disque.

La luminance du ciel et l'éclat relatif des étoiles

Le cinquième mémoire sur la photométrie décrit la mesure de la luminance du ciel autour du Soleil. Pour ce faire, Arago utilise toujours le même montage, mais cette fois il règle la position longitudinale du prisme de Rochon pour que les deux images du Soleil ainsi formées soient séparées. Arago ne s'intéresse ici qu'à l'image faible, et mesure l'angle entre le polariseur et le prisme de Rochon contenus dans la lunette jusqu'à ce que cette image disparaisse dans le fond de ciel. Il en déduit que le ciel autour du Soleil a une luminance environ 500 fois plus faible que le disque solaire, et remarque que cette luminance est sensiblement uniforme jusqu'à 30 minutes de degré du bord solaire.

Le sixième mémoire est beaucoup plus intéressant, car il contient la discussion de la polarisation de la lumière des étoiles dont nous avons déjà parlé, et de leur photométrie. L'éclat des étoiles n'est alors repéré que par des estimations visuelles : on les classe de la première à la sixième grandeur, dans une échelle empirique approximativement logarithmique, liée à la sensibilité de l'œil. Arago est l'un des premiers, avec William Herschel et son fils John (figure 8.23), à en faire de véritables mesures. Faute d'étalon photométrique, il n'est encore possible que de faire des mesures relatives. Certains comparent



Figure 8.23. John Herschel (1792-1871), photographie de Julia Margaret Cameron.

^m C'est bien ce que dit Secchi, mais son modèle est beaucoup trop simpliste.

l'éclat de l'étoile à mesurer avec celui d'une bougie réfléchi par une sphère polie⁵². John Herschel compare l'éclat de l'étoile à mesurer à celui de la Lune dont il fait une image quasi ponctuelle. En recommençant cette comparaison pour plusieurs étoiles, il peut ainsi obtenir leur éclat relatif.

On peut aussi comparer l'éclat des étoiles à celui de l'une d'entre elles considérée comme étalon, par exemple Sirius, la plus brillante d'entre elles, en les observant successivement avec une même lunette. On diaphragme l'objectif dans l'observation de Sirius de façon à ce que les deux étoiles paraissent de même luminosité : il suffit en principe de comparer la surface du diaphragme avec celle de l'objectif non diaphragmé pour obtenir leur éclat relatif. C'est ce qu'avait fait William Herschel. Arago rejette cette méthode pour deux raisons : non seulement il est difficile d'apprécier l'égalité des éclats en pointant la lunette sur une étoile puis sur l'autre, ou en regardant successivement ces étoiles avec des lunettes différentes, mais de plus on n'a pas la certitude que l'atténuation de la lumière soit bien proportionnelle à la surface du diaphragme. Arago va donc utiliser le montage de la figure 8.19, et règle l'angle dont il fait tourner le polariseur de façon à ce que l'image la plus faible de l'étoile disparaisse dans le fond du ciel. Répétant l'opération sur une autre étoile, il est alors capable de comparer leur éclat pourvu que le fond du ciel soit le même dans les deux cas.

Les résultats obtenus par Laugier, auquel Arago a confié ces mesures, sont un peu erratiques. Cela vient de ce que le fond du ciel est variable dans le temps et selon la direction, et aussi de ce que la turbulence atmosphérique étale plus ou moins les images : si l'image d'une étoile est fine, on la détecte plus facilement sur le fond du ciel que si elle est étalée. En dépit de ces faiblesses, les résultats obtenus ne sont pas mauvais quand on les compare aux mesures modernes, comme l'illustre la figure 8.24, et à d'autres mesures contemporaines (Tableau 8.1). Arago, peut-être suspicieux des résultats de Laugier, conclut ses études photométriques en affirmant :

« Je ne réclame d'autre mérite que celui d'avoir donné aux astronomes un instrument de mesure exact et commode. »

Si la méthode d'Arago est effectivement très commode et peut s'appliquer à des étoiles assez faibles,

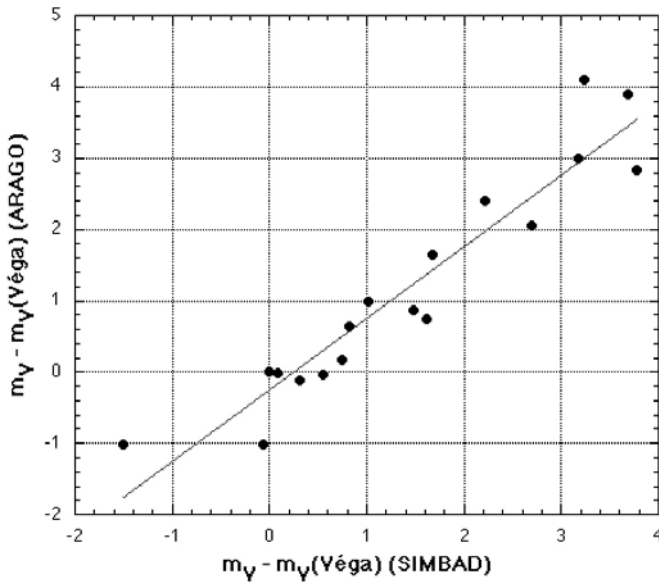


Figure 8.24. Comparaison des résultats photométriques d'Arago et Laugier avec les résultats modernes (SIMBAD). Les échelles des coordonnées sont en magnitudes, telles que $m = -2,5 \log I + \text{constante}$, I étant l'éclat de l'étoile. Les résultats d'Arago sont en ordonnées, et les résultats de mesures photométriques récentes en abscisses. Les constantes sont ajustées de telle façon que Véga soit à l'origine des coordonnées. On constate que bien que les résultats soient assez dispersés, ils s'ordonnent autour d'une droite de pente unité peu éloignée de la première bissectrice : il n'y a donc pas d'incertitude systématique dans ces mesures. Leur dispersion, due principalement aux fluctuations de la luminance du ciel et de la turbulence atmosphérique, et accessoirement à la variabilité propre des étoiles, est d'une demi-magnitude, soit d'un facteur 1,5 en intensité.

jusqu'à la cinquième magnitude, il est difficile de la qualifier d'exacte. Cependant, elle a l'avantage de permettre de comparer l'éclat d'étoiles très éloignées les unes des autres. Finalement, il y aura peu de mesures faites ainsi en France puisque tout va s'arrêter avec la mort d'Arago et l'avènement de Le Verrier que cela n'intéresse pas, et elles ne marqueront pas l'histoire.

Quelques années après la mort d'Arago, l'allemand Karl August Steinheil construit un photomètre reposant sur un principe différent : il fait des images défocalisées de deux étoiles à comparer, qu'il étale plus ou moins jusqu'à ce qu'elles soient de même luminance. L'utilisation de ce photomètre par Philip Ludwig von Seidel donne des résultats meilleurs que ceux d'Arago et de Laugier (l'erreur probable en est estimée à 0,05 magnitude), mais il est limité aux étoiles brillantes. Un photomètre plus utilisable⁵⁷ est conçu en 1859-1861 par l'allemand Johann Karl Friedrich Zöllner (figure 8.25). Ces deux photomètres ne permettent cependant que de comparer des étoiles assez peu éloignées les unes des autres. Celui que l'américain Edward C. Pickering développe entre 1875 et 1877 n'a pas cet inconvénient⁵⁸ (figure 8.26). Son principe est semblable à celui de l'instrument d'Arago, lequel permet si l'on veut de comparer directement l'éclat de

deux étoiles situées dans son champ de vue, en égalant l'éclat de l'image faible de la plus brillante des deux à celui de l'image forte de la moins brillante. Pickering met à profit cette propriété en envoyant à la fois dans ce champ l'image de l'étoile à mesurer et celle de l'étoile polaire prise comme référence, dont la lumière est captée grâce à un prisme. C'est ce dispositif qui va permettre d'obtenir les magnitudes du grand catalogue stellaire d'Harvard.

Tableau 8.1. Comparaison de différentes photométries stellaires du XIX^e siècle avec les mesures modernes.
Les mesures sont rapportées à Véga (sauf pour celles de John Herschel, qui sont rapportées à Arcturus) et données en magnitudes.
La colonne de droite donne les valeurs modernes.

Étoile	Arago-Laugier (c.1850)	W. Herschel (1817) ⁵³	J. Herschel (1834-8) ⁵⁴	Seidel (1852) ⁵⁵	Seidel (1862) ⁷	Zöllner (1861) ⁵⁶	V-V _{Sirius} (2006)
Sirius (α CMa)	-1,01	-0,88	-1,94	-1,64	-1,58		-1,50
Arcturus (α Boo)	-1,01		-0,07 (ref.)	-0,19	0,25		-0,07
Véga (α Lyr)	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00-0,06	0,00
Rigel (β Ori)	-0,02		0,04	-0,16	0,01		0,09
Procyon (α CMi)	-0,12	0,34	0,29	0,34	0,39	0,34	0,31
Bételgeuse (α Ori)	-0,04		0,37				0,55
Altaïr (α Aql)	0,17		0,72	0,78	0,78		0,74
Aldebaran (α Tau)	0,64			1,12	1,29		0,82
Spica (α Vir)	0,99						1,01
ϵ CMa	0,86						1,48
Bellatrix (γ Ori)	0,74		1,29				1,61
ϵ Ori	1,64		1,67				1,67
γ Cyg	2,41					2,08-2,19	2,21
γ Aql	2,06						2,69
ζ Cyg	3,00					3,55	3,17
λ Ori	4,10						3,24
β Aql	3,89						3,68
σ Ori	2,83						3,77

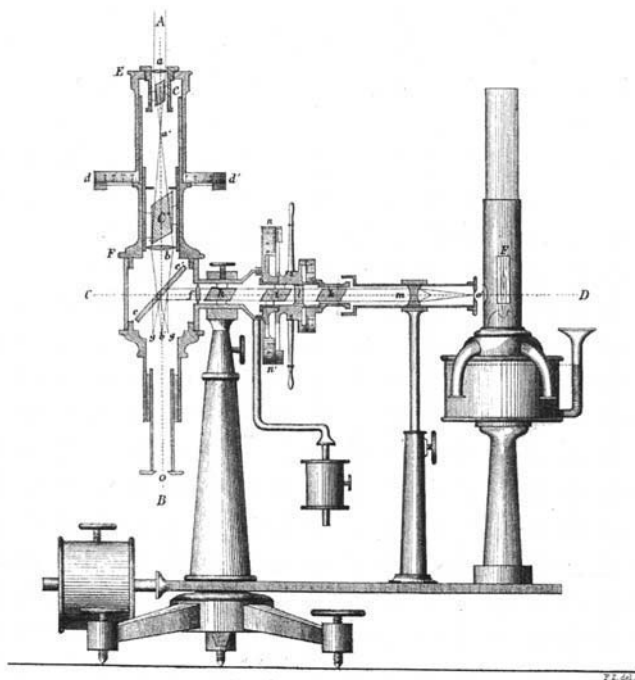


Figure 8.25. Le photomètre de Zöllner. La lumière provenant de l'étoile (en haut) est atténuée par deux prismes de Nicol dont on peut faire varier l'angle, et comparée visuellement grâce à une lame semi-transparente à 45° à celle d'une source de laboratoire (lampe à pétrole) elle-même atténuée de façon connue par deux prismes de Nicol. La couleur de cette lampe peut être modifiée en utilisant la polarisation chromatique réalisée par un ensemble lame de quartz/prisme de Nicol interposés entre ces deux prismes.

On constate que les photomètres de Zöllner et de Pickering sont directement dérivés de l'instrument d'Arago. Ils utilisent tous deux l'atténuation contrôlée de la lumière des étoiles par un couple polariseur-analyseur d'orientation variable, et celui de Zöllner utilise même la polarisation chromatiqueⁿ. Il nous paraît donc injuste d'oublier une fois de plus Arago, comme on le fait presque toujours dans les histoires de l'astronomie : sa méthode photométrique est nouvelle et intéressante, et il n'en est que plus regrettable que l'on n'ait fait que si peu d'observations avec elle dans notre pays.

Le septième mémoire sur la photométrie est aussi disparate que le sixième, bien que communiqué à l'Académie des sciences du vivant d'Arago. Sans doute Arago est-il trop malade pour le présenter lui-même, et il est lu par quelqu'un d'autre. Le premier texte qu'il contient décrit une méthode pour déterminer l'altitude des

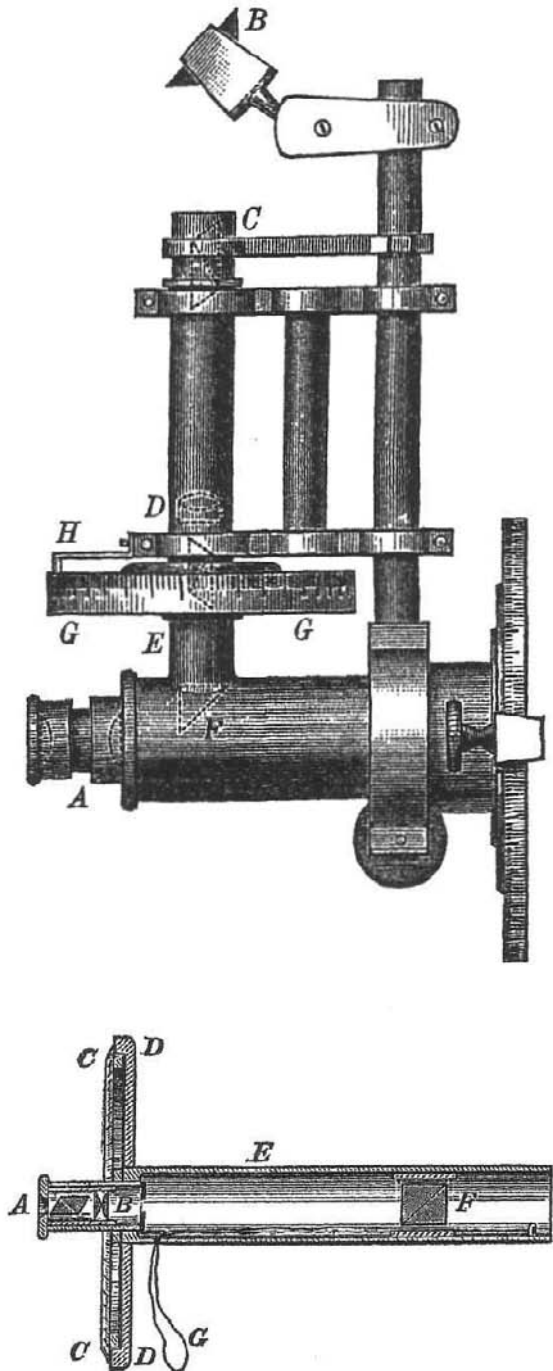
ⁿ Toutes les mesures restent relatives : ce n'est que bien plus tard que l'on réussira à étalonner de façon absolue l'éclat des étoiles en comparant leur rayonnement à celui d'un corps noir.

Figure 8.26. Les photomètres de Pickering (vers 1877).

En bas, coupe du premier photomètre. Il se place dans une lunette à la place de l'oculaire. La lumière, qui vient de droite, traverse un prisme biréfringent de Rochon que l'on peut déplacer longitudinalement avec la corde G, puis l'oculaire B et un prisme de Nicol situé entre celui-ci et l'œil, dont on peut repérer l'angle de rotation avec le cercle CC et les index DD.

Cet instrument est semblable à celui d'Arago (figure 8.19), la seule différence étant que le prisme de Nicol est placé à l'avant de celui de Rochon chez Arago, ce qui ne change rien mais nécessite qu'il soit de grande taille. En haut, le second photomètre, presque semblable au premier, mais où l'on peut faire entrer par le tube CE et le prisme à réflexion totale F la lumière d'une étoile de référence, qui passe à l'extérieur du tube du télescope et est captée par le prisme à réflexion totale orientable B.

Le tube CE contient deux prismes de Nicol que l'on peut faire tourner l'un par rapport à l'autre pour atténuer la lumière de l'étoile de référence.



nuages, méthode astucieuse dont nous parlerons au chapitre suivant. Les trois autres textes sont consacrés à la photométrie. L'un décrit des mesures photométriques, toujours faites avec une lunette de Rochon devant laquelle est placée un polariseur, de la lumière réfléchie vers la Terre par les différentes parties de la surface lunaire. Le suivant contient des résultats sur la lumière cendrée, qui résulte de l'éclairement par la Terre de la partie de la Lune qui n'est pas éclairée par le Soleil : Arago en mesure une luminance de l'ordre de 1/4 000 de celle de la partie éclairée par le Soleil, et constate qu'elle est variable au cours du temps en fonction de la couverture nuageuse de la Terre. Enfin, la dernière partie concerne des mesures peu fructueuses de l'éclat de Jupiter et de ses satellites.

La scintillation et le diamètre des étoiles

Comme tous les astronomes observateurs, Arago est gêné par la scintillation qui fait varier l'éclat apparent et la couleur des étoiles, et par ce que nous appelons aujourd'hui le « *seeing* », qui étale les images. Ce sont deux aspects liés de l'effet de la turbulence de l'atmosphère terrestre lors la propagation de la lumière. L'atmosphère gêne aussi considérablement les mesures géodésiques faites pendant le jour en brouillant et déplaçant les images. Arago, qui avait réfléchi depuis longtemps à la scintillation, lui consacre en 1852 une longue notice⁵⁹. Il en donne une bonne définition :

« Pour une personne regardant le ciel à l'œil nu, la scintillation consiste en des changements d'éclat des étoiles très-souvent renouvelés. Ces changements, ordinairement, sont presque toujours accompagnés de variations de couleurs et de quelques effets secondaires, conséquences immédiates de toute augmentation ou diminution d'intensité, tels que des altérations considérables dans le diamètre apparent des astres ou dans les longueurs des rayons divergents qui paraissent s'élaner de leur centre, suivant diverses directions. »

L'explication d'Arago

Bien entendu, les effets de la scintillation étaient observés depuis longtemps par les astronomes, mais les explications

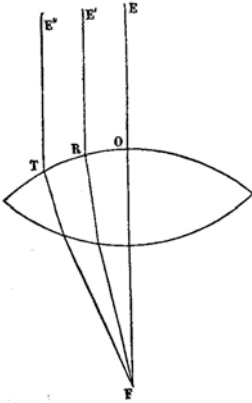


Figure 8.27. Explication initiale de la scintillation par Arago. Les trois rayons provenant d'une étoile arrivent en phase au foyer de la lentille. Si l'un d'eux est affecté par l'atmosphère, son déphasage produit une variation de couleur et de luminosité de l'image focale.

qu'ils avait tenté d'en donner étaient en général plutôt fantaisistes. Arago en donne un historique, bien documenté comme à l'ordinaire. Ce n'est qu'à partir d'Huygens que l'on voit apparaître l'idée que la scintillation est due à l'atmosphère terrestre, mais tout reste vague : pour Huygens « *La scintillation des étoiles est le résultat d'une agitation tremblante des vapeurs qui environnent notre Terre* »⁶⁰. Arago est le premier à en donner une véritable explication. Elle a été « *remise à M. de Humboldt en 1814^o, insérée à la fin du livre IV du Voyage aux régions équinoxiales du nouveau continent, p. 97-99* »⁶¹, lue devant l'Académie des sciences le 26 février 1816, mais non publiée par elle. On voit dans le mémoire d'Arago de 1852 par quels tâtonnements il est parvenu à son explication de la scintillation par un phénomène d'interférences ; il est curieux qu'il en ait gardé la trace dans son exposé final.

Il rappelle d'abord ses expériences d'interférences où il a observé que l'interposition d'une lame de verre dans un des faisceaux occasionne un déplacement des franges. Ses expériences avec les gaz lui ont montré des déplacements semblables. Il considère maintenant l'objectif d'une lunette avec laquelle on observe une étoile, et rappelle que, par définition, les longueurs du trajet optique des différents rayons sont égales lorsqu'ils arrivent au foyer, en l'absence d'effets de l'atmosphère (figure 8.27). Il suppose qu'un changement de l'indice de réfraction de l'air affecte un de ces rayons, produisant un déphasage par rapport aux autres rayons : l'interférence entre tous les rayons produit des effets colorés au foyer. Arago trouve par l'expérience qu'il suffit que 1/20 de la surface de la lentille soit affectée par un déphasage important pour que le changement de couleur soit sensible. Puis il écrit :

« *Si l'on songe à la grande longueur du trajet qu'a parcouru la lumière depuis les limites supérieures de l'atmosphère jusqu'à la lentille ; à la très-petite différence comparative de réfringence qui suffit pour faire passer deux rayons de la période d'accord à celle de destruction ; à l'effet des vents amenant sans cesse, quelque modérés qu'ils soient, des couches atmosphériques nouvelles en face de la lentille, on ne s'étonnera pas qu'en observant Sirius, étoile assez basse dans nos latitudes, on ait noté jusqu'à trente changements*

^o C'est avant la rencontre d'Arago avec Fresnel : Arago connaissait donc déjà le travail de Young sur les interférences de la lumière.

de couleur par seconde. [...] Que l'on veuille bien remarquer maintenant que l'œil peut être assimilé à une lentille ayant à son foyer un écran nerveux nommé la rétine, et l'on reconnaîtra que tout ce que nous avons dit de la grande lentille, partie principale de la lunette, est applicable à l'œil. »

Mais Arago se rend compte de l'insuffisance de ce modèle simpliste et continue comme suit :

« Je n'ai fait intervenir la différence de chemins parcourus par les rayons [c'est-à-dire de trajectoires des rayons], ni dans l'explication de la scintillation à l'œil nu, ni dans l'explication de la scintillation qui s'opère au foyer d'une lunette. Ces différences, si elles ont lieu, devraient être prises en considération ; or il est évident que de très-légères inégalités de routes existent quelquefois.

« Supposons qu'un rayon dont la réfraction a été troublée en plus dans un certain point de l'atmosphère éprouve plus tard, en un autre point, une perturbation en moins qui compense la première perturbation ; ce rayon ira au foyer de la lunette rencontrer un rayon normal, un rayon qui n'aura subi aucun trouble dans sa marche, qui n'aura pas éprouvé, si l'expression m'est permise, le mouvement d'anguille d'où peut résulter une différence de route propre à produire une interférence positive ou négative. La même chose peut être dite des rayons qui ont été déviés latéralement, déviation à l'aide de laquelle on explique comment l'image d'une étoile s'étale, s'épanouit parfois, subitement et pour de très courts instants. Ce sont là des causes microscopiques, presque insaisissables, et qui cependant amènent des changements d'intensité et de couleur manifestes. »

La théorie d'Arago, exposée comme on le voit d'une façon assez fumeuse, donne une explication de la scintillation que l'on pourrait trouver correcte à première vue, mais qui ne l'est pas réellement car elle ne respecte pas le principe de la conservation de l'énergie lumineuse. En effet, la quantité de lumière qui arrive en provenance d'une étoile est sensiblement constante. S'il y a une interférence négative en certaines régions, qui y produit une diminution de la lumière, elle est nécessairement compensée dans une autre région par une interférence positive qui augmente le flux lumineux.

Pour bien comprendre la scintillation, il est commode de considérer la surface d'onde, c'est à dire le lieu où les différents rayons qui arrivent sur l'instrument sont en phase les uns avec les autres. S'il n'y avait pas d'atmosphère,

la surface d'onde provenant d'une étoile serait un plan perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière. Mais la turbulence de l'atmosphère déforme continuellement cette surface, la dimension caractéristique de ces déformations étant de l'ordre de 10 cm dans des conditions habituelles en lumière visible. Observons une étoile avec une lunette dont le diamètre est plus petit que 10 cm : la surface d'onde qui parvient sur l'objectif est tantôt inclinée, ce qui déplace l'image latéralement, tantôt concave, ce qui augmente la convergence de l'instrument et forme l'image (généralement déformée) en avant du foyer normal, tantôt convexe, ce qui produit l'effet opposé, avec bien entendu des cas intermédiaires. Dans tous les cas, la quantité de lumière est la même, mais l'image que l'on observe avec un oculaire qui met au point sur le foyer est continuellement déformée, déplacée et étalée, avec des effets chromatiques. Il en est de même si l'on observe l'étoile à l'œil nu. On peut aussi raisonner comme Arago en considérant que l'image est le résultat des interférences entre les rayons qui frappent les différentes parties de la surface de l'objectif : par exemple, dans un cas idéal, le foyer est le lieu où tous les rayons ayant traversé l'objectif arrivent en phase (voir la figure 8.27). La démonstration est alors rigoureuse, mais plus complexe que celle que nous venons de faire dans le cadre de l'optique géométrique ; cependant, le résultat est qualitativement le même.

Avec un grand instrument, il faut considérer la surface d'onde sur toute l'étendue de l'objectif. Elle présente alors de nombreuses zones de déformation, dont la taille moyenne est de l'ordre de 10 cm ; la lumière est sensiblement en phase à l'intérieur de chacune d'elles, et l'image résulte des interférences entre toutes ces zones. Elle est formée à un instant donné de petites taches ou *spicules* résultant de ces interférences, taches qui s'allument, s'éteignent et se déplacent si rapidement que l'œil ou le récepteur n'enregistrent qu'une image étalée d'apparence immuable.

À l'époque d'Arago il n'était pas possible de construire un modèle quantitatif de la scintillation, faute d'une théorie de la turbulence de l'atmosphère. Cette théorie n'a été développée que dans les années 1930 par le russe Andreï Kolmogorov et appliquée à la scintillation en 1961 par Valerian Tatarski. Les perturbations que l'atmosphère apporte aux images astronomiques sont aujourd'hui très bien comprises ; on sait même les corriger dans

l'infrarouge proche par la technique dite de l'optique adaptative, qui « redresse » continuellement la surface d'onde au moyen d'un miroir déformable interposé sur le trajet de la lumière dans le télescope, si bien que l'on peut dans les observatoires terrestres bénéficier complètement du pouvoir de résolution des télescopes et obtenir des images encore meilleures que celles du Télescope spatial Hubble qui n'est pas gêné par l'atmosphère, mais n'a qu'un diamètre de 2,4 mètres.

Le scintillomètre d'Arago

Afin d'obtenir une estimation qualitative de la scintillation dans le but de décider si les étoiles scintillent davantage lorsqu'elles sont plus basses sur l'horizon, sujet sur lequel les informations qu'il a recueillies sont contradictoires, Arago imagine un « scintillomètre ». Il a remarqué que si l'on recule l'oculaire d'une lunette en partant du foyer, non seulement l'image de l'étoile observée devient floue mais il arrive un moment où il n'y a presque plus de lumière dans sa partie centrale. Il interprète correctement ce phénomène en décomposant la surface de l'objectif en deux zones concentriques : lorsque l'on s'éloigne du foyer, il arrive un moment où la lumière de la zone centrale est en gros en opposition de phase avec celle de la zone extérieure, d'où un assombrissement central par interférence entre ces deux lumières. En plaçant l'oculaire à la position médiane entre le foyer et la position où l'éclairement central est minimum, on augmente la sensibilité à la scintillation : il y a encore au milieu de l'image défo-calisée un disque sombre, dans lequel on voit apparaître de temps en temps un point lumineux : ceci signifie qu'il y a une partie de l'objectif où le déphasage est compensé par l'effet des irrégularités d'indice de réfraction dans l'atmosphère. En comptant le nombre d'apparitions de ce point lumineux pendant un certain intervalle de temps, on obtient une estimation de l'importance de la scintillation : plus les apparitions sont fréquentes, plus l'effet de l'atmosphère est grand.

En 1851, Goujon et Mathieu font à la demande d'Arago des observations de ce type avec une lunette de 91 mm d'ouverture diaphragmée à 47 mm (la méthode ne marcherait pas avec des ouvertures plus grandes qu'une dizaine de centimètres). Ils constatent qu'il peut y avoir

entre 5 et 30 apparitions de points brillants en 5 minutes, que la scintillation ne dépend pas de l'étoile observée mais uniquement de sa hauteur pour une nuit donnée, et qu'elle est plus importante quand l'étoile est basse sur l'horizon, ce qui répond à la question que s'était posée Arago. Ce dernier suggère d'autres moyens d'estimer la scintillation, mais ils ne seront pas mis en œuvre. Quant à son « *scintillomètre* », il ne semble pas avoir été beaucoup utilisé par la suite, et c'est dommage. C'est sans doute, une fois encore, la conséquence du licenciement des collaborateurs d'Arago par Le Verrier.

Le diamètre des étoiles

Deux petits chapitres de *l'Astronomie populaire* sont consacrés au diamètre des étoiles⁶². Arago y fait, comme à l'ordinaire, un historique très documenté de la question, et met en évidence les contradictions qu'il y constate. Avant l'invention des lunettes astronomiques, Tycho Brahe attribuait à Sirius un diamètre angulaire de 4 minutes de degré, tandis que les étoiles moins brillantes lui paraissaient plus petites, moins d'une minute pour les étoiles les plus faibles visibles à l'œil nu. Les étoiles observées à travers une lunette semblaient encore plus petites : ainsi Pierre Gassendi trouvait pour Sirius un diamètre apparent de 10 secondes de degré, et Cassini I seulement 5 secondes de degré. Arago écrit :

« Les énormes différences que présentèrent d'abord les valeurs du diamètre d'une même étoile données par différents astronomes [...] étaient bien propres à faire supposer que les disques de ces astres n'avaient rien de réel. Hévélius parvint, lui, à rendre les formes des étoiles constantes, rondes, bien terminées, bien définies, en plaçant devant l'objectif de sa lunette une plaque métallique percée d'un trou rond de petit diamètre. Il se persuada alors avoir triomphé de la difficulté du problème. Cependant, en remplaçant la première ouverture par une plus resserrée, il aurait vu ses disques s'agrandir sans rien perdre de leur netteté. »

Ce texte ainsi que d'autres épars dans *l'Astronomie populaire*, montrent qu'Arago a compris que le pouvoir de résolution de l'œil ou de la lunette déterminent en très grande partie le diamètre angulaire apparent des étoiles observées. Il sait que ce pouvoir de résolution est limité

par la diffraction, et il a observé les anneaux de diffraction autour de l'image d'une étoile observée avec une petite lunette⁶³ (ces anneaux ont été décrits par Airy, et on leur donne son nom). Ce pouvoir de résolution est de l'ordre de la minute de degré à l'œil nu, et de la seconde pour une lunette de 10 cm de diamètre. Cependant la turbulence atmosphérique fait que le diamètre apparent observé des étoiles est rarement inférieur à la seconde de degré : en augmentant le diamètre d'une lunette ou d'un télescope au-delà de 10 cm d'ouverture, on ne gagne plus rien en pouvoir de résolution, mais seulement en luminosité. Et puis, la saturation de l'œil fait que l'image des étoiles les plus brillantes paraît plus étalée que celle des étoiles plus faibles, et c'est ce qui explique les affirmations de Tycho Brahe. Arago savait-il tout cela ? C'est probable, mais il est difficile d'en être certain. Il écrit cependant avec bon sens :

« En thèse générale, on doit prendre pour le diamètre des étoiles la plus petite valeur qu'on lui ait jamais trouvée, sans avoir même la certitude que cette plus petite valeur représente le diamètre réel. »

Il rappelle alors qu'avec ses grands télescopes, dont la qualité optique devait être excellente, Herschel a mesuré un diamètre apparent de 0'',36 pour Véga en 1781 et même, à travers le brouillard, 0'',2 pour Arcturus. Ce sont là des résultats exceptionnels, et Arago le sait bien. Il continue :

« En prenant ces dimensions pour réelles, et d'après les distances les plus petites que l'on puisse supposer de ces étoiles à la terre (distances telles que leur lumière arrive en trois ans), leurs diamètres réels seraient respectivement de 14 millions et de 8 millions de lieues [1 lieue = 4 km]. [...] Ces diamètres [...] sont probablement fort exagérés. »

Arago entreprend alors une démarche de physicien : il compare les étoiles au Soleil pour calculer leur diamètre réel. Il sait que Huygens, Michell, Lambert et finalement Wollaston en 1829 ont comparé, ce qui n'est pas facile, l'éclat du Soleil et de Sirius vus de la Terre. Wollaston trouve que le Soleil est $2 \cdot 10^9$ fois plus brillant que Sirius, avec une assez grande incertitude (la valeur actuelle est $1,53 \cdot 10^9$)⁶⁴. Si l'on suppose que Sirius est semblable au Soleil, son diamètre linéaire et sa luminance sont les mêmes, et sa distance est donc $(2 \cdot 10^9)^{1/2}$ fois celle du Soleil

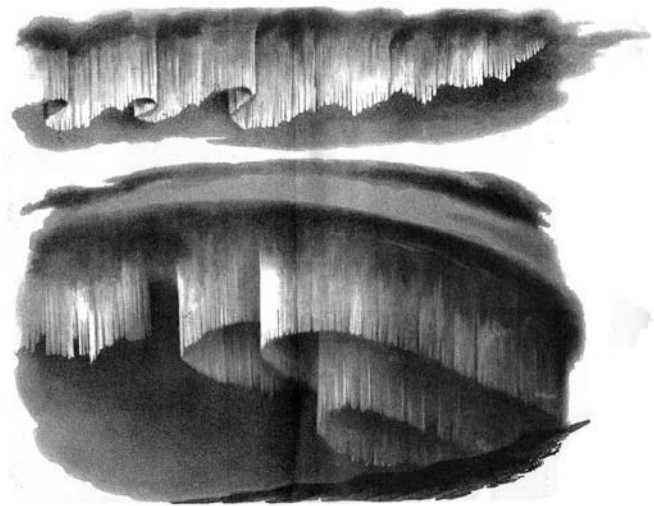
(150 millions de kilomètres), soit $6,7 \cdot 10^{12}$ km, puisque l'éclat d'une étoile est inversement proportionnel au carré de sa distance. Le diamètre angulaire de Sirius est égal au diamètre apparent du Soleil divisé par le rapport des distances, soit $31' / (2 \cdot 10^9)^{1/2} = 0'',04$. Mais Wollaston pense que Sirius doit être au moins 10 fois plus loin ; si cela est exact, il est donc au moins 100 fois plus lumineux que le Soleil. En supposant que la luminance de sa surface est toujours égale à celle du Soleil (ce qui est en fait faux, elle est plus grande), son diamètre apparent est alors inférieur à $0'',005$. Prudent, Arago se contente de dire qu'il doit être inférieur à $0'',05$. Il est curieux que ni lui ni Barral, en éditant *l'Astronomie populaire*, n'aient utilisé la parallaxe de Sirius mesurée par les écossais Thomas Henderson et Maclear entre 1832 et 1835, soit $0'',15$: elle est pourtant citée dans *l'Astronomie populaire* (t. 1, p. 435) peu après le chapitre sur le diamètre des étoiles. Ils auraient alors trouvé un diamètre angulaire encore plus faible^P.

Le raisonnement qui précède se trouve presque entièrement dans le remarquable article de Wollaston. Arago n'a rien fait ici d'original, mais il est intéressant qu'il l'ait repris : cette démarche d'astrophysicien est exceptionnelle en France, alors qu'elle est bien plus courante Outre-Manche. Malheureusement tout cela s'est éteint après sa mort : l'astrophysique française était mort-née et ne reprendra timidement qu'avec le seul Jules Janssen, une décennie plus tard.

^P En réalité, la parallaxe de Sirius est $0'',389$, ce qui correspond à une distance de $7,92 \cdot 10^{13}$ km ; son diamètre linéaire est 1,711 fois celui du Soleil et son diamètre apparent $0'',00585$.

Chapitre 9

Arago géophysicien et météorologue



Aurores boréales¹.

*Rien n'échappait à Arago de ce qui tient
à la physique du globe.²*

Si Arago est connu comme astronome et comme physicien, on sait moins, peut-être, qu'il était à son époque un spécialiste reconnu de la météorologie, de la physique du globe et de l'océanographie. Il est vrai que ces disciplines entraient partiellement dans les attributions des astronomes : depuis la fondation de l'Observatoire de Paris, on y faisait des observations de magnétisme terrestre et de météorologie. Arago a continué et renouvelé cette tradition, surtout en ce qui concerne le magnétisme qui le passionnait. Mais il est allé bien au-delà, en s'intéressant de près à d'autres sujets comme la température de la Terre, les courants de l'océan, les vents, etc. Sans doute ses aventures en Méditerranée ont-elles développé chez lui une prédilection particulière pour la mer. Mais c'est surtout son ami Humboldt, grand voyageur s'il en fut, qui l'a influencé. On verra Arago collationner les observations anciennes et contemporaines, en faire beaucoup lui-même, et profiter de sa situation dominante et de ses connaissances, dont l'étendue est impressionnante, pour inciter les marins et les voyageurs à faire de nouvelles observations afin de construire une vue synoptique des propriétés de la Terre, de ses océans et de son atmosphère. Ses *Instructions pour la Physique du globe* de 1835, rédigées en quinze jours pour préparer la mission autour du monde du navire *La Bonite*^a, constituent un résumé des connaissances et des idées d'Arago en matière de physique du globe ; elles établissent un cadre sérieux pour les observations scientifiques à faire lors des expéditions maritimes. Nous reproduisons l'essentiel de ce texte important dans l'Appendice 3, précédé d'un texte anglais sur le même sujet, mais datant de 1666.

Les idées d'Arago sont fortes et précises : deux ans après avoir écrit ces instructions, il considère dans un discours du 5 juin 1837 à la Chambre des députés que le nouveau voyage projeté par Dumont d'Urville n'est pas bien conçu^b,

^a *La Bonite* n'était en rien un navire océanographique : il avait « pour mission spéciale d'aller porter des agents consulaires sur les points les plus éloignés du globe », passant même à Hawaï, ce qui était exceptionnel pour un navire français.

^b Dumont d'Urville découvrira tout de même la Terre Adélie au cours de ce voyage, ce qui n'est pas rien.

avec des navires mal adaptés, et il exprime sa « *répugnance pour les voyages de simple curiosité* »³. Il précisera encore ses idées dans de nouvelles instructions rédigées en 1838 et en 1853 pour l'exploration scientifique de l'Algérie⁴.

Arago s'intéresse également aux « *voyages aéronautiques exécutés dans l'intérêt de l'avancement de la science* » et indique à Jean-Augustin Barral et à Jacques-Alexandre Bixio, un député à l'Assemblée législative qui partage les idées d'Arago, l'instrumentation qu'ils devront embarquer lors de leurs vols en ballon de 1850. Ils embarqueront effectivement ce matériel, préparé par le physicien Victor Regnault⁵.

Nous allons explorer les différents aspects des recherches d'Arago en physique du globe, en commençant par la météorologie.

Arago et la météorologie

Naissance de la science météorologique⁶

À l'époque d'Arago, on est loin de considérer la météorologie comme une science. On se contente de faire des relevés de la température, de la pression, de l'humidité et des vents plusieurs fois par jour, à l'Observatoire de Paris et en divers autres lieux du territoire national. Dans les premiers temps, les relevés de température n'avaient de valeur que pour étudier la variation relative de la température en un même lieu pendant quelques années, car les thermomètres n'étaient pas étalonnés et souvent même pas gradués, et la série s'arrêtait avec leur destruction éventuelle. C'est par chance que les commissaires de l'Académie des sciences ont pu comparer la température de l'hiver 1776 à Paris avec celle de l'hiver 1709 : on avait heureusement conservé à l'Observatoire un thermomètre non gradué sur lequel le minimum atteint en 1709 avait été marqué d'un trait ! Il faut attendre que Réaumur en France entre 1730 et 1740, et en même temps Celsius en Suède et Fahrenheit en Allemagne, inventent le « *langage des thermomètres* » en étalonnant des thermomètres gradués avec des températures fixes reproductibles par chacun (glace fondante, eau bouillante, température du corps humain), pour que l'on puisse comparer des mesures prises en différents lieux et à différentes époques. Dès lors les relevés réguliers se multiplient, au point que l'on peut

en 1776 comparer les températures minimales relevées dans 24 villes de France et 25 sites à l'étranger⁷. Mais il n'y a pas encore de publication régulière des observations météorologiques, et l'Observatoire se fait des revenus en vendant ses résultats.

Au début du XIX^e siècle, les observations météorologiques de l'Observatoire sont publiées annuellement par Bouvard dans la *Connaissance des temps*, et dans d'autres journaux comme le *Journal de Physique* de Delamétherie. On y trouve les températures et les pressions minimales et maximales, ainsi que le degré hygrométrique et la direction du vent à midi. De nouveaux instruments sont établis en 1810. Mais Arago, qui avait déjà réalisé des observations systématiques à Formentera (figure 9.1), estime que c'est insuffisant. Il écrit à la fin de sa vie :

Observations faites à Formentera

8 Janvier 1808

Heure	Temp. (°C)	Press. (m)	Press. corrigée (m)
4 ^h 30'	12,1	0,7506	0,7491
9 ^h 0'	12,1	0,7504	0,7489
10 ^h 30'	12,5	0,7502	0,7487
Midi	13,6	0,7498	0,7480
1 ^h 30'	13,5	0,7487	0,7470
3 ^h 0'	13,1	0,7483	0,7467
4 ^h 15'	12,6	0,7484	0,7468
5 ^h 45'	12,0	0,7488	0,7470
7 ^h 0'	11,8	0,7480	0,7466
8 ^h 45'	11,7	0,7461	0,7446
10 ^h 15'	12,0	0,7469	0,7454
10 ^h 55'	12,0	0,7471	0,7456

9 Janvier 1808

Heure	Temp. (°C)	Press. (m)	Press. corrigée (m)
2 ^h (minut)	12,0	0,7469	0,7446
9 ^h 0'	12,2	0,7458	0,7438
9 ^h 25'	12,4	0,7452	0,7436
10 ^h 20'	12,8	0,7453	0,7436
11 ^h 15'	13,0	0,7452	0,7434
Midi 25'	13,0	0,7440	0,7429
1 ^h 45'	13,0	0,7437	0,7419
3 ^h 20'	13,0	0,7436	0,7418
5 ^h 30'	12,0	0,7436	0,7419
7 ^h 0'	12,0	0,7440	0,7423
8 ^h 5'	12,0	0,7440	0,7424
9 ^h 45'	11,5	0,74410	0,7425

Figure 9.1. Registre autographe d'observations météorologiques d'Arago à Formentera. On y trouve une douzaine de mesures par jour de la température en °C, de la pression atmosphérique brute en mètre de mercure, puis de la pression corrigée de l'effet de la température.

« Par goût et par devoir, je me suis consacré, pendant toute ma carrière scientifique, à l'étude de la météorologie, qui embrasse l'ensemble des phénomènes produits à la surface de notre planète sous l'influence de la chaleur, de l'électricité et de la lumière. Peut-être, par mes efforts, ai-je fait faire quelques progrès à une science qui mérite l'attention, non-seulement de ceux qui se complaisent à rechercher les grandes lois de la nature, mais encore de tous ceux qui s'occupent des intérêts généraux de l'humanité.

« Dès que j'eus acquis quelque influence à l'Observatoire de Paris, je modifiai le système d'observations météorologiques qui s'y faisaient régulièrement, mais d'après un plan défectueux. J'adoptai celui qui avait été si heureusement tracé par Ramond dans sa station de Clermont-Ferrand. Ces observations, réduites avec beaucoup de soin, furent insérées [pour chaque mois] dans les Annales de chimie et de physique de 1816 et années suivantes [et également dans les Comptes Rendus dès leur création en 1835]. Un résumé général paraissait régulièrement avec le numéro de décembre. »

À partir de 1816, on mesure donc chaque jour à 9 h du matin, midi, 3 h et 9 h de l'après-midi la pression avec un baromètre de Fortin, la température, le degré hygrométrique donné par un hygromètre à cheveu, et enfin à midi l'état du ciel et la direction du vent. Cette direction est indiquée par une girouette qui actionne une flèche sur un cadran, au plafond de la voûte en coupole au Nord de la salle de la méridienne⁸. Le tableau mensuel donne en plus des moyennes par décade et pour le mois, incluant celles des minima et maxima de la température. Il indique aussi la quantité cumulée de pluie, mesurée avec le pluviomètre installé par Cassini IV au-dessus de l'escalier menant au petit observatoire de la terrasse (figure 9.2), et, pour contrôle, avec un autre pluviomètre situé dans la cour Nord de l'Observatoire. Arago ne semble pas avoir participé lui-même à ces observations, qui ont longtemps été faites par Joseph-Marie Bouvard, le frère d'Alexis Bouvard. Les instruments enregistreurs n'apparaîtront qu'à partir de 1850 : le remarquable anémomètre enregistreur construit en 1734 par Pajot d'Ons en Bray⁹ n'a eu, en effet, aucune postérité immédiate.

Quand on manque une observation, on utilise les plus proches et on interpole ! Lorsqu'il prendra le pouvoir, Le Verrier fera sur ce point un commentaire perfide¹⁰ :

« On ne manquait jamais de faire remarquer que jusque-là le tableau météorologique avait toujours présenté une

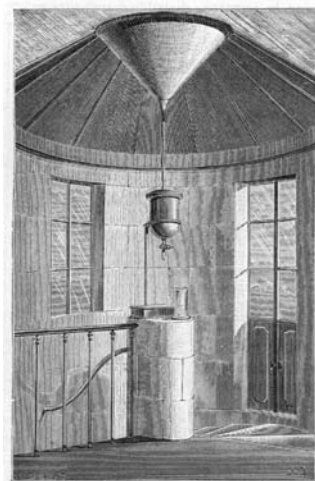


Figure 9.2. Le pluviomètre de Cassini IV à l'Observatoire de Paris. Il a probablement été quelque peu remanié avant l'époque de cette gravure (vers 1860).

régularité admirable, l'observation semblant ne jamais faire défaut à l'heure dite. Mais tout cela n'était que mirage : la vérité est qu'un grand nombre d'observations n'étaient pas faites, et qu'on a donné pendant longtemps pour des observations ce qui n'était que des nombres calculés. »

Bien entendu, cette remarque entraîne une réponse de Laugier, qui affirme que de tels cas étaient exceptionnels.

Que faire de toutes ces mesures ? Arago et Bouvard s'intéressent particulièrement aux variations diurnes de la pression atmosphérique. Découvertes lors de l'expédition au Pérou en 1735-1744 et bien étudiées par Humboldt, elles font l'objet d'un mémoire de Bouvard à l'Académie des sciences¹¹, qui conclut qu'« *il est impossible d'établir quelque chose de certain, sur le phénomène des marées atmosphériques* ». Laplace, grand spécialiste des marées, avait de son côté essayé en vain de détecter « *l'action de la Lune sur l'atmosphère* » en utilisant les observations faites depuis 1816¹².

Prévisions météorologiques

Bien entendu, tout le monde veut savoir quel temps il fera le lendemain. Mais, malgré les pressions, Arago se refuse absolument à utiliser les mesures pour faire des prévisions. Il déclare¹³ :

« Jamais une parole sortie de ma bouche, ni dans l'intimité, ni dans les cours que j'ai professés pendant quarante années, jamais une ligne publiée avec mon assentiment, n'ont autorisé personne à me prêter la pensée qu'il serait possible, dans l'état de nos connaissances, d'annoncer avec quelque certitude le temps qu'il fera une année, un mois, une semaine, je dirai même un seul jour d'avance. »

Cependant la situation va évoluer rapidement après sa mort, grâce aux progrès du télégraphe électrique. Ayant remarqué dès 1854, à la suite de l'enquête qui lui avait été demandée pour déterminer la trajectoire d'une violente tempête qui avait détruit 41 navires en mer Noire le 14 novembre, que les perturbations se déplacent presque toujours de l'Ouest vers l'Est en Europe, Le Verrier, qui vient de succéder à Arago à la tête de l'Observatoire, se sent capable de faire des prévisions rudimentaires. Après avoir amélioré les observations météorologiques (figure 9.3), il crée dans ce but en 1856 la « *Météorologie*

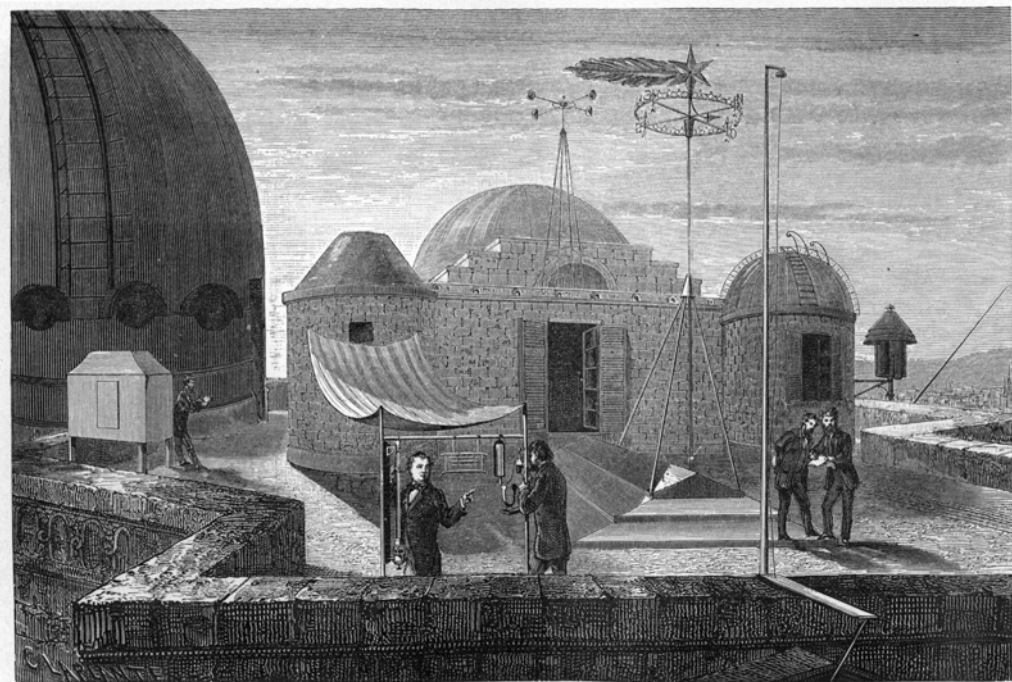


Figure 9.3. La station météorologique sur la terrasse du haut de l'Observatoire de Paris au temps de Le Verrier.

télégraphique » qui constituera pendant son règne la principale activité de l'Observatoire¹⁴ :

« Il a été convenu avec M. le Directeur général de Vougy, que l'Administration des Lignes télégraphiques ferait recueillir les observations par ses agents et les ferait transmettre à l'Observatoire impérial de Paris, partie par le télégraphe, partie par la poste ; tandis que de son côté l'Observatoire fournirait les instruments et les instructions, et réduirait les observations.

« Les stations, au nombre de vingt-quatre, sont réparties entre les divers bassins du Rhin, de la Seine, de la Loire, de la Gironde et du Rhône, de manière à faire connaître le mieux possible l'ensemble de l'état atmosphérique de chacun des grands bassins. [...] Les diverses observations sont insérées dans plusieurs journaux.

« Il y aurait grand intérêt à étendre à l'étranger l'organisation nouvelle. Des ouvertures faites en ce sens ont été partout accueillies avec empressement. »

Effectivement, le réseau d'informations météorologiques par télégraphe s'étendra progressivement à toute l'Europe, à la Russie et à la Turquie. Depuis 1849, le *Smithsonian Institute* dirigé par le physicien Joseph Henry, que nous avons rencontré au chapitre 6 à propos de l'induction électromagnétique, construit de son côté un réseau météorologique télégraphique aux États-Unis, qui s'étend progressivement à toute l'Amérique ; le réseau français et le réseau américain sont respectivement à l'origine de Météo-France et du *National Weather Service*.

Mais, assez curieusement, les efforts de Le Verrier pour prévenir les ports de l'approche des tempêtes, en utilisant les informations qui lui sont transmises par télégraphe, se heurteront à l'inertie de la Marine et ne porteront leurs fruits que vers 1864.

Une approche synoptique

Si Arago a fortement poussé le développement du télégraphe électrique au cours des dernières années de sa vie, il n'avait pas imaginé qu'il puisse un jour servir à



Figure 9.4. Lignes isothermes d'une partie du globe, d'après Humboldt et Arago. Les températures indiquées sur chaque ligne sont des températures annuelles moyennes, en degrés Celsius.

faire des prévisions météorologiques. Mais son intérêt est ailleurs : avec Humboldt, il rêve d'une approche synoptique de la météorologie et du climat sur toute l'étendue du globe terrestre, et il pense que le télégraphe sera utile pour collecter les données nécessaires. En attendant, nos deux amis incitent les navigateurs à faire en mer et dans les ports des relevés météorologiques les plus fréquents possibles. Dès les années 1810, on peut déduire de ces mesures une carte du globe où sont reportées des lignes d'égale température moyenne annuelle (figure 9.4). Bien que publiée dans l'*Astronomie populaire* « d'après la projection de M. Arago » cette carte est due à Humboldt, ce que reconnaît volontiers Arago¹⁵ : dans sa notice « *Sur la distribution de la Chaleur à la surface du globe* » parue dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* pour 1820, Arago indique en note : « *Cet article peut être considéré comme un extrait de l'excellente dissertation que M. de Humboldt a insérée dans le dernier volume de la Société d'Arcueil, Sur la distribution de la chaleur à la surface du globe.* »

Dans le même ordre d'idée, Arago s'intéresse aux vents et à leur origine, et surtout aux alizés, ces vents des régions intertropicales de direction générale Nord-Est/Sud-Ouest dans l'hémisphère Nord, et Sud-Est/Nord-Ouest l'hémisphère austral. Dans ses Instructions pour le voyage de la Bonite (Appendice 3), il recommande que l'on profite d'une escale dans la grande île d'Hawaï pour gravir les 4 200 m du volcan Mauna Loa, en mesurant au cours de l'ascension la direction du vent, dans le but de constater éventuellement le « *vent supérieur* » qui serait dirigé en sens contraire des alizés à basse altitude « *d'après l'explication des vents alisés le plus généralement adoptée* ». Il s'agit de celle donnée en 1735 par l'anglais George Hadley (figure 9.5) et qui est toujours valable : l'air chaud et humide de l'équateur monte vers la tropopause et se dirige de chaque côté de l'équateur vers les latitudes plus élevées. Il est dévié vers la droite (donc vers l'Est dans l'hémisphère Nord) par ce qu'on appellera plus tard l'accélération de Coriolis, due à la rotation de la Terre. Lorsque cet air atteint environ 30° de latitude, s'étant refroidi, il descend et forme une région de haute pression. Il rejoint alors l'équateur en étant toujours dévié vers la droite (donc cette fois vers l'Ouest dans l'hémisphère Nord) : ce sont les alizés. Le contre-vent d'altitude, en sens inverse, a d'ailleurs été mis en évidence, selon Arago, par le déplacement de nuages très élevés, par la chute à la Barbade de

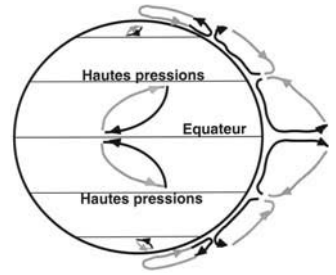


Figure 9.5. Schéma de la circulation générale des vents dans l'atmosphère terrestre. On distingue dans chaque hémisphère trois cellules de circulation fermées, vues en coupe à droite, à l'extérieur du cercle figurant la Terre : celle de Hadley aux basses latitudes, celle de Ferrel aux latitudes moyennes et la cellule polaire. La rotation de la terre fait que l'air circulant horizontalement est dévié vers la droite dans l'hémisphère Nord, son mouvement à basse altitude ne suivant pas les méridiens. Les vents bas de la cellule de Hadley sont les alizés, représentés en noir sur le globe et dans la cellule ; les contre-vents d'altitude sont représentés en gris. Les vents polaires, également représentés ; sont observables, ceux de la cellule intermédiaire de Ferrel sont très perturbés et ne sont pas représentés.

poussières lancées par le volcan de l'île de Saint-Vincent, et par des observations directes du capitaine Basil Hall et de Humboldt au sommet du pic de Ténériffe¹⁶. Les phénomènes sont inverses dans l'hémisphère austral.

Orages et foudre

Arago accumule par ailleurs une énorme base de données sur les orages, le tonnerre et les trombes (figure 9.6) : sa notice sur le tonnerre n'occupe pas moins de 394 pages dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes*, et s'accroît encore de 11 pages dans les *Cœuvres complètes*¹⁸. Sa rédaction a représenté un travail considérable :

« J'ai été obligé de recourir aux sources originales ; de parcourir plusieurs centaines de volumes du Recueil de l'Académie des Sciences, des Transactions philosophiques de Londres, de la Collection de Berlin, du Journal de Physique, etc., etc. ; de faire le dépouillement d'une multitude d'ouvrages, de relations de voyages anciens et modernes, de Mémoires écrits, la plupart sans méthode, sans netteté, sans but ; de lire, enfin, tout ce qui s'offrait à moi, avec l'espoir, souvent déçu, de découvrir au milieu de mille détails oiseux, un fait, une remarque, un simple chiffre, utiles à la science. »

Le résultat final est cependant décevant. On y trouve une description très complète des orages, du tonnerre, de la foudre et de ses effets, mais aucune tentative d'explication ; il est vrai que la matière est difficile ! C'est à peine si Arago parle d'électricité à propos de la foudre. Il conclut cependant :

« Nous pensons être parvenu à montrer l'identité de l'électricité ordinaire de nos laboratoires et de l'électricité atmosphérique [surtout en constatant que la foudre, comme les étincelles du laboratoire, produit de l'acide nitrique à partir de l'oxygène, de l'azote et de la vapeur d'eau de l'air]. Mais il reste à expliquer d'où vient l'immense quantité de matière de la foudre... »

Il n'y parvient évidemment pas, de même d'ailleurs qu'aucun de ses contemporains. Ce n'est pas faute d'observations, d'autant plus qu'il a effectué lui-même en 1829 et 1830 pas moins de 2 047 observations de l'électricité atmosphérique réparties sur 237 jours, à l'aide d'un électromètre connecté au chapeau d'un paratonnerre¹⁹. Sans doute ces observations n'ont-elles rien

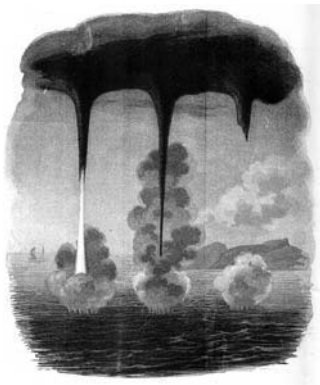


Figure 9.6. Évolution d'une trombe¹⁷.

donné d'intéressant, car elles n'ont jamais été publiées. Ce n'est qu'au siècle dernier que sont apparus des instruments plus perfectionnés, qui devaient permettre de progresser jusqu'à la connaissance moderne²⁰.

La Lune rousse

Arago a eu plus de succès pour expliquer l'équilibre thermique de la surface terrestre. Aidé par sa connaissance probable des mémoires de Joseph Fourier et par l'ouvrage consacré à la rosée d'un physicien anglais, William Charles Wells²¹, il comprend que le sol se refroidit vers l'espace en émettant du « *calorique rayonnant* » (c'est-à-dire du rayonnement infrarouge vers 10 micromètres de longueur d'onde) : le sol peut alors se trouver à une température inférieure de 6 à 8°C à celle de l'atmosphère, ce qui produit la rosée et éventuellement des gelées. Mais l'interposition d'un écran évite ce refroidissement « *car la perte de calorique [...] est compensée presque exactement par le rayonnement en sens contraire de la surface inférieure de l'écran, la température de cette surface étant peu différente de celle de l'air qui la touche* ». S'il y a des nuages, ils font office d'écran et limitent donc le refroidissement du sol. Cette physique, au demeurant assez simple, a fait l'objet de plusieurs notices réunies plus tard dans un long article²². Arago y révèle notamment l'intérêt qu'il porte à l'agriculture, en explorant diverses conséquences de ces observations. Il lutte contre les préjugés des paysans concernant l'influence de la Lune sur la végétation²³, mais montre que certaines croyances populaires ne sont pas dénuées de fondement, notamment le phénomène dit de la Lune rousse²⁴.

L'histoire, racontée par Arago lui-même²⁵, est amusante. Sous la Restauration, une délégation du Bureau des longitudes va chaque année présenter au roi la *Connaissance des Temps* et l'*Annuaire* de ce Bureau. Au cours de cette cérémonie, Louis XVIII manifeste parfois son intérêt pour des sujets inattendus : « *Je suis charmé de vous voir réunis autour de moi, aurait-il dit un jour à la députation du Bureau des longitudes, car vous m'expliquerez nettement ce que c'est que la Lune rousse et son mode d'action sur les récoltes.* » Laplace qui conduit la délégation et à qui s'adressent plus particulièrement ces paroles, est atterré. Il ne peut que répondre que la Lune rousse n'occupe aucune place dans les théories astronomiques.

Chargé par Laplace de l'éclairer sur la Lune rousse, Arago enquête auprès des jardiniers du Jardin des plantes sur ce phénomène attribué à la pleine Lune de fin avril ou de mai, laquelle est réputée faire geler et roussir les bourgeons. Il y consacre plusieurs notices scientifiques qui démontrent l'exactitude de l'observation populaire (figure 9.7) : si l'on voit la Lune c'est que le ciel est clair, et le refroidissement des corps à la surface de la Terre, parmi lesquels les bourgeons particulièrement vulnérables, peut les faire geler.

Arago n'ira pas plus loin. Mais en lisant le remarquable *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces interplanétaires*²⁶ écrit en 1824 par Joseph Fourier, on constate que celui-ci a compris que l'atmosphère terrestre elle-même, et pas seulement les nuages, limite le refroidissement de la surface terrestre par effet de serre (une désignation beaucoup plus tardive). Il écrit :

« L'interposition de l'air modifie beaucoup les effets de la chaleur à la surface du globe. Les rayons du soleil, traversant les couches atmosphériques condensées par leur propre poids [allusion à l'équilibre hydrostatique de l'atmosphère], les échauffe très inégalement : celles qui sont plus rares [raréfiées] sont aussi les plus froides, parce qu'elles éteignent et absorbent une moindre partie de ces rayons. La chaleur du soleil, arrivant à l'état de lumière, possède la propriété de pénétrer les substances solides ou liquides diaphanes [transparentes], et la perd presque entièrement lorsqu'elle s'est convertie, par sa communication aux corps terrestres, en chaleur rayonnante obscure. Cette distinction de la chaleur lumineuse [visible] et de la chaleur obscure [infrarouge] explique l'élévation de température causée par

Figure 9.7. Début d'un brouillon autographe d'Arago consacré à la Lune rousse.

De la Lune rousse (C)
 et de l'influence ^{qu'elle exerce} sur les phénomènes de la
 végétation, particulièrement dans les
 environs de Paris.

les corps transparents^c. [...] La présence de l'atmosphère produit un effet du même genre, mais qui, dans l'état actuel de la théorie et à raison du manque d'observations comparées, ne peut encore être exactement défini. »

En 1838, Claude Pouillet mesure pour la première fois la constante solaire, c'est à dire la puissance reçue à la Terre par unité de surface perpendiculaire à la direction du Soleil, en la corrigeant des effets de l'atmosphère terrestre qu'il estime en faisant des observations pour différentes hauteurs du Soleil dans des conditions stables²⁷. Le résultat est excellent compte tenu de la difficulté de la mesure : Pouillet obtient 1230 watts par mètre carré, la valeur moderne étant 1367^d. Les travaux de Pouillet seront sans doute oubliés, car cette quantité sera remesurée au début du xx^e siècle par les américains Samuel P. Langley, qui se trompera dans sa réduction, puis par Charles G. Abbot qui ne fera finalement pas mieux que Pouillet. Quant à l'absorption du rayonnement par l'atmosphère, c'est l'anglais John Tyndall qui aura le mérite de montrer en 1861 que la vapeur d'eau et le gaz carbonique en sont les principaux responsables, en raison des bandes d'absorption qu'ils présentent dans l'infrarouge proche, et qu'ils donc à l'origine de l'effet de serre²⁸. Curieusement, lorsque Foucault et Fizeau observent en 1840 et 1846 la présence de ces bandes d'absorption dans le spectre du Soleil en infrarouge proche²⁹, ils n'imaginent pas que cette absorption puisse se produire dans l'atmosphère terrestre et soit responsable de l'effet de serre.

De son côté, Arago soupçonne que les activités industrielles peuvent perturber le climat³⁰ :

« M. Espy dit s'être assuré, par diverses voies, que le climat de Manchester a éprouvé des modifications graduelles et sensibles, à mesure que l'industrie manufacturière s'est développée.

^c C'est ce qui se passe dans une serre. Vers 1780, Horace Bénédicte de Saussure avait déjà étudié les effets thermiques du rayonnement solaire avec son « *héliothermomètre* » constitué d'une boîte de bois à fond noir fermée par quatre épaisseurs successives de verre. Il avait déjà suggéré que, comme le verre, l'atmosphère peut retenir la chaleur.

^d Pouillet et ses successeurs comme Secchi expriment aussi cette constante par l'épaisseur de glace que le rayonnement solaire ferait fondre en un an : cela parlait peut-être mieux aux contemporains, mais tend à embrouiller les idées.

Depuis que cette ville est devenue, pour ainsi dire, une vaste fournaise, il y pleut, plus ou moins, tous les jours. »

Mais il reste prudent et ne commente guère ces observations. Par ailleurs Barral mentionne³¹

« des discours prononcés en 1836 et 1838 par l'illustre physicien à la Chambre des députés, à propos de la discussion d'une proposition sur la liberté du défrichement des forêts, qui avait conduit naturellement les orateurs à débattre la question de savoir si le déboisement, exécuté sur une vaste échelle, modifie les climats. M. Arago s'attacha à montrer alors le grand nombre de faits qu'il serait utile d'observer et de contrôler pour bien résoudre toutes les parties d'une question très-complexe, quoiqu'il n'y ait aucun doute cependant à conserver sur la réalité de l'influence exercée. »

Ainsi commencent timidement à se faire jour quelques préoccupations écologiques.

Phénomènes d'optique atmosphérique

On ne saurait s'étonner que le grand observateur qu'était Arago se soit intéressé aux phénomènes d'optique atmosphérique. Il y consacre une longue notice³² qui ne présente plus guère d'intérêt pour nous. Astronome et passionné par la navigation, il a écrit sur la réfraction et l'horizon apparent en mer, problème important pour la détermination de la latitude qui repose sur la mesure au sextant de la hauteur du Soleil par rapport à cet horizon³³.

Spécialiste de la polarisation de la lumière, il est naturel qu'Arago pense à braquer vers le ciel son polariscope dès après qu'il l'ait inventé en 1811. C'est alors qu'il fait une découverte importante : celle de la polarisation de la lumière du ciel pendant le jour. Arago effectue de nombreuses observations de ce phénomène en 1812, 1814 et 1815, et en établit empiriquement les lois³⁴. Il s'agit visiblement d'un phénomène lié à l'éclairement de l'atmosphère par le Soleil, puisque le maximum de polarisation se trouve à environ 90° de la direction de celui-ci. D'ailleurs la lumière du ciel éclairé par la Lune est également polarisée. Arago ne pouvait pas comprendre l'origine de ce phénomène, qui n'a été élucidée par Lord Rayleigh qu'au début du xx^e siècle: il s'agit d'un mode de diffusion de la lumière par les atomes ou les molécules, que l'on a baptisé diffusion Rayleigh (encadré 9.1).

Encadré 9.1. la diffusion Rayleigh

Le champ électrique oscillant de l'onde électromagnétique qu'est la lumière, en tombant sur un atome ou une molécule isolée, déforme périodiquement le nuage électronique, si bien que le barycentre des charges négatives des électrons oscille par rapport à celui des charges positives des noyaux. Le dipôle oscillant ainsi créé rayonne dans toutes les directions à la fréquence de l'onde, ce qui produit une diffusion de la lumière. L'intensité diffusée dépend fortement de la longueur d'onde : en conséquence, la lumière diffusée est beaucoup plus bleue que la lumière solaire incidente (c'est le bleu du ciel). La lumière transmise est diminuée et rougie : c'est ce qui produit l'absorption et la couleur rouge de la lumière du Soleil près de son lever ou de son coucher, car l'épaisseur d'atmosphère traversée par cette lumière est alors très grande. La lumière diffusée est partiellement polarisée, comme l'a observé Arago. La diffusion Rayleigh n'est efficace que si les particules diffusantes sont isolées et bien plus petites que la longueur d'onde de la lumière, donc si ce sont des atomes, des molécules ou de très fines poussières.

Arago remarque également que la lumière d'un nuage éclairé par le Soleil n'est pas polarisée, propriété qu'il a fait vérifier par Barral et Bixio lors de leurs vols en ballon : ceci provient du fait qu'elle est diffusée par des gouttes d'eau sphériques qui sont bien plus grosses que la longueur d'onde. Cela lui donne l'idée qu'on pourrait mesurer l'altitude des nuages de la façon suivante³⁵. La lumière solaire diffusée dans la partie de l'atmosphère qui est située devant le nuage est partiellement polarisée, mais évidemment, plus le trajet est court et moins la lumière diffusée est importante. Il suffit donc de mesurer son taux de polarisation et de le comparer au taux d'une région voisine hors du nuage, où la polarisation provient de toute l'épaisseur de l'atmosphère, pour calculer la distance du nuage, d'où son altitude. L'idée est astucieuse, mais il ne semble pas qu'elle ait jamais été appliquée.

Enfin Arago observe la polarisation du halo qui entoure quelquefois le Soleil. Il écrit en 1825³⁶ :

« M. Arago annonce [à l'Académie des sciences] qu'en examinant avec un instrument de son invention, un halo qui entourait le soleil vers les onze heures du matin, il a reconnu, dans la lumière dont ce halo était formé, des traces non équivoques de polarisation par réfraction [par des cristaux de glace]. Cette expérience exclut toute explication du phénomène qui serait fondée sur l'hypothèse d'une réflexion [par des molécules ou par des substances vitreuses]. M. Arago pense que l'instrument dont il s'est servi dans cette circonstance pourra, plus généralement, lui apprendre quand un nuage sera gelé, et qu'il fournira dès-lors le moyen d'étudier la loi du décroissement de la chaleur dans l'atmosphère. »

Encore un espoir déçu : on n'a guère de trace d'observations de ce type par d'autres qu'Arago lui-même.

Le magnétisme terrestre

Les premières mesures

Depuis le Moyen-Âge, on a appris à repérer en mer, mais aussi sur terre, la direction du Nord avec une boussole. Cependant, on s'est aussi rendu compte que la boussole n'indique pas vraiment le Nord : sa direction en diffère d'un angle appelé déclinaison magnétique, qui varie lentement au cours du temps. Il est donc extrêmement important pour la navigation de connaître cette déclinaison magnétique et de suivre ses variations. Aussi les observations magnétiques ont-elles commencé à l'Observatoire de Paris — comme d'ailleurs à Greenwich — dès sa fondation ; elles ont été continuées ensuite sans interruptions notables³⁷. On a ainsi mesuré régulièrement non seulement la déclinaison, mais aussi l'inclinaison magnétique avec une aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal. À Paris, ces mesures ont manqué de précision jusqu'en 1777, époque où Cassini IV a totalement renouvelé les méthodes d'observation, en mettant en pratique des techniques inventées par Le Monnier et par Coulomb. Non seulement les mesures de déclinaison sont devenues plus précises, mais la sensibilité de l'instrument (figure 9.8) est telle qu'on peut mesurer la variation diurne de la déclinaison, et aussi les perturbations liées aux aurores boréales dont nous parlerons plus loin.

Les mesures d'Arago³⁹

Dès 1810, Arago s'intéresse très directement aux mesures magnétiques dont il fera un très grand nombre. Le magnétisme terrestre a été constamment l'objet de son attention et a suscité chez lui de nombreuses réflexions. Il écrit en introduction de son mémoire :

« Rien, dans le vaste domaine de la physique du globe, n'est plus caché, plus incertain, que les causes qui en chaque lieu font varier les trois éléments du champ magnétique terrestre, à savoir la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité. Il faut se résigner, à l'époque actuelle, à réunir les mesures qui serviront de base aux recherches de nos successeurs. »

Il ne se borne cependant pas à cette compilation, et cherche à tirer des conclusions générales de ses observations, à défaut d'en comprendre les causes. Ce qui le préoccupe au premier chef est de déterminer les lois de la variation diurne de la déclinaison magnétique, et d'étudier les perturbations qu'éprouve l'aiguille aimantée sous l'influence des causes extérieures. Il installe donc à l'Observatoire, aux alentours de 1820, de nouveaux instruments plus performants que ceux de ses devanciers : une boussole de déclinaison, une boussole de variation installée dans la salle de la méridienne, et une boussole d'inclinaison, toutes les trois dues à Gambey. Enfin, pour mesurer l'intensité magnétique, ce qui est assez nouveau, Arago fait construire un nouvel instrument, la boussole d'intensité. Examinons ces instruments, dont il ne subsiste que très peu d'exemplaires bien qu'ils aient été commercialisés :

1. La boussole de déclinaison de Gambey (figure 9.9).

Ce magnifique instrument est un perfectionnement de la boussole de déclinaison de Cassini IV représentée dans la figure 9.8. Le barreau aimanté est suspendu par un fil sans torsion et protégé des courants d'air par une boîte en bois, munie de fenêtres permettant de voir les extrémités du barreau. L'ensemble peut tourner autour d'un axe vertical, sa position étant repérée sur un cercle gradué fixe. Une lunette mobile autour d'un axe perpendiculaire à la boîte permet de viser un repère éloigné, par exemple l'étoile polaire, ce qui permet de connaître la direction du Nord géographique. Mais la même lunette peut également, grâce à une lentille supplémentaire A placée en avant de l'objectif BB, viser les repères (croisées de

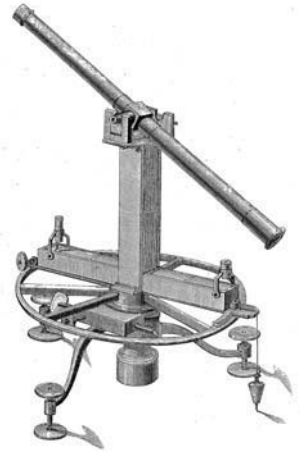
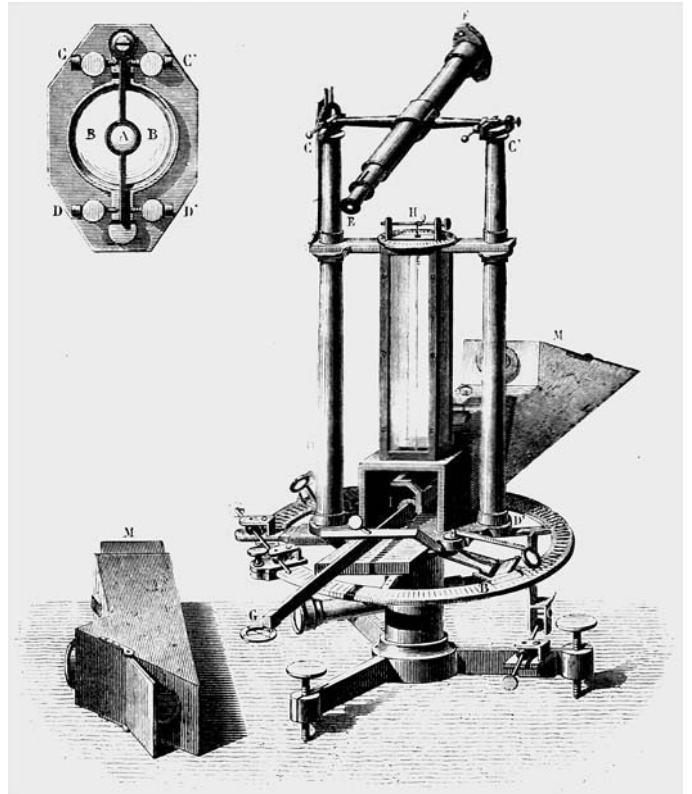


Figure 9.8. La boussole de déclinaison absolue de Cassini IV, construite par le citoyen Michel, ouvrier de Madame Lennel³⁸. Un barreau aimanté horizontal, suspendu par un fil de soie dont le couple de torsion est négligeable, se trouve à l'intérieur de la boîte en bois. La boîte, et la lunette située au-dessus, peuvent tourner et leur position est repérée au moyen du cercle horizontal gradué. On aligne d'abord la boîte sur le barreau, qui indique le Nord magnétique, au moyen des microscopes visibles aux deux extrémités de cette boîte. Puis on tourne l'ensemble jusqu'à ce que la lunette, mobile autour d'un axe perpendiculaire à la boîte, vise l'étoile polaire. L'angle dont on a tourné, que l'on mesure avec le cercle, est à une petite correction près (l'étoile n'est pas tout à fait au pôle) la déclinaison magnétique.

Figure 9.9. La boussole de déclinaison de Gambey. Le barreau aimanté est placé dans une boîte de bois dont la partie avant est montrée démontée en bas à gauche. La figure en haut à gauche représente l'objectif de la lunette supérieure EF. Explications dans le texte.



fil) placés aux deux bouts du barreau aimanté. On peut ainsi mesurer grâce au cercle gradué l'angle entre le Nord géographique et le Nord magnétique. La lunette placée sous le cercle sert à vérifier que l'instrument n'a pas été déplacé pendant les mesures. L'appareil est entièrement en cuivre, en laiton, en bois et en verre, sauf bien entendu le barreau aimanté.

Comme Cassini IV l'avait remarqué, le bâtiment de l'Observatoire contient du fer et la détermination de la déclinaison ne peut y avoir lieu. Arago fait donc construire dès 1823 dans le jardin, à 60 mètres au sud de ce bâtiment, un observatoire magnétique tout en pierre et en bois, suivi de deux autres dans les années 1830 (figure 9.10). Il fait lui-même, au moins une fois chaque année de 1818 à 1835, une mesure de la déclinaison. Ensuite, les mesures seront faites par Laugier et par d'autres.

2. La boussole de variations diurnes de Gambey (figure 9.11).

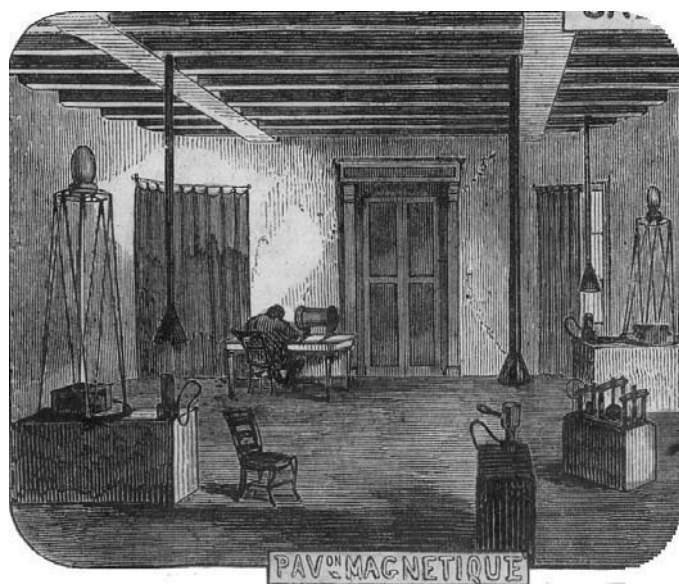


Figure 9.10. Le pavillon magnétique de l'Observatoire de Paris (Gravure de 1862). Les instruments qui avaient été utilisés par Arago ne figurent plus sur cette image.

Pour observer les variations de la déclinaison magnétique au cours de la journée, il n'est pas nécessaire de s'éloigner beaucoup de tout matériau magnétique, et Arago peut plus confortablement s'installer dans la salle de la méridienne de l'Observatoire. Il y utilise la boussole de variations diurnes. Comme dans la boussole de déclinaison, un barreau aimanté est suspendu à un fil sans torsion et est enfermé dans une boîte en bois. Mais il n'y a pas besoin de repérer son orientation, et on peut se contenter d'observer les fluctuations de sa direction avec les microscopes qui en visent les extrémités. Arago fait lui-même jusqu'en 1835 le nombre énorme de 52 599 mesures de déclinaison avec ce genre d'appareil, qui remplissent six grands volumes in-folio. On a peine à imaginer comment un homme aussi occupé peut trouver le temps nécessaire pour cela. Il déduit de ces observations l'amplitude de la variation diurne de la déclinaison au cours de l'année.

3. La boussole d'inclinaison de Gambey (figure 9.12).

L'aspect de cet appareil nous est plus familier que celui des deux précédents. La mesure consiste à noter l'inclinaison de l'aiguille grâce au cercle gradué vertical, cette aiguille étant placée le plus souvent dans le plan du méridien magnétique, repéré par un autre instrument. Le cercle gradué horizontal permet de faire des mesures dans

Figure 9.11. La boussole des variations diurnes de Gambey. Explications dans le texte.

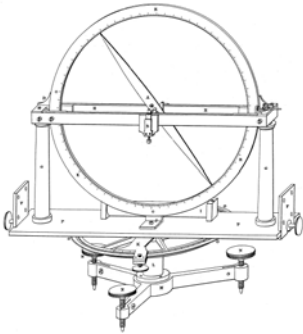
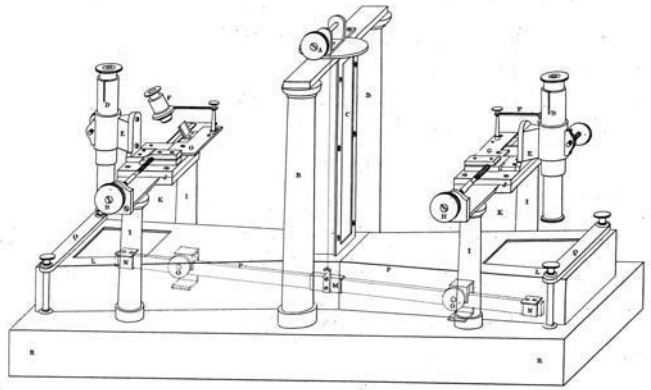


Figure 9.12. La boussole d'inclinaison de Gambey.



différents azimuts. Arago a fait au cours de sa carrière environ 20 000 mesures d'inclinaison (figure 9.13).

4. La boussole des intensités (figure 9.14).

Pour mesurer l'intensité de la composante horizontale du champ magnétique, Arago utilise une boussole des intensités, qui est constituée d'une aiguille aimantée suspendue à un fil sans torsion. On écarte l'aiguille de sa position d'équilibre : elle est rappelée vers cette position, la dépasse et oscille. Ces oscillations sont d'autant plus rapides que le champ magnétique est plus intense. On compte donc pendant un temps donné le nombre d'oscillations de l'aiguille, en prenant soin de l'écarter toujours d'un même angle de sa position d'équilibre avant de la libérer. Un microscope permet de suivre ces différentes opérations. La boîte où se trouve l'aiguille aimantée est en bois, car une boîte métallique aurait amorti les oscillations de l'aiguille.

Bien entendu, les mesures ainsi effectuées sont relatives. Il faut d'ailleurs les corriger de l'effet de la température qui change l'aimantation de l'aiguille. Arago propose d'étalonner de façon relative l'aiguille aimantée en utilisant le magnétisme de rotation, ce qui devrait permettre de rendre comparables entre elles les mesures d'intensité faites en différents lieux⁴⁰. Pour ceci, il monte l'aiguille utilisée dans une boussole d'inclinaison orientée perpendiculairement au champ magnétique terrestre, de telle manière qu'elle n'en ressente pas les effets. On charge une de ses extrémités d'un poids, et on fait tourner tout près, à une vitesse connue, un disque de cuivre

Observation de l'Inclinaison de l'aiguille
 aimantée faite à l'observation le 28 avril 1822
 de soir,
 Boussole d'Inclinaison qu'on appelle
 une Desormay dans son voyage au tour du monde
 aiguille $12^{\circ} 2'$.
 Détermination de l'azimut par la méthode de l'aiguille
 face au nord.
 quand la pointe d'en haut est dans la verticale, on lit sur l'azimut $170^{\circ} 55'$
 quand la pointe d'en bas est dans la verticale, on lit $18^{\circ} 35'$
 Moyenne = $18^{\circ} 15'$
 face au Sud
 quand la pointe d'en haut est dans la verticale, on a $199^{\circ} 55'$
 quand la pointe d'en bas est dans la verticale, on a $199^{\circ} 20'$
 Moyenne = $199^{\circ} 37,5'$

$\begin{array}{r} 18.15 \\ + 199.37,5 \\ \hline 181.22,5 \\ 180 \\ \hline 1^{\circ}.22',5 \\ \hline 2 = 41' \end{array}$	$\begin{array}{r} 18.15' \\ 41 \\ \hline 18^{\circ} 56' \\ 90^{\circ} 00'' \\ \hline 108^{\circ} 56' = \text{azimut de l'aiguille aimantée} \end{array}$
--	--

Figure 9.13. Une page d'un registre autographe d'Arago contenant des mesures d'inclinaison magnétique.



Figure 9.14. Une boussole des intensités. Explications dans le texte. L'appareil, qui appartient à l'Observatoire de Paris et n'est pas signé, est transportable dans une mallette. On voit devant à droite une aiguille aimantée avec sa boîte de transport.

parallèlement à son plan : l'aiguille est entraînée d'un certain angle qui dépend de son état magnétique, dont on peut ainsi vérifier s'il a varié ou non. Poisson propose une autre méthode, dérivée des expériences de Coulomb⁴¹. Il semble qu'aucune de ces deux méthodes, dont la mise en œuvre est difficile, ait jamais été employée.

De toute façon, il n'est pas question de faire des mesures absolues d'une quantité dont l'unité n'existe pas encore. C'est Carl Friedrich Gauss qui définira cette unité, à laquelle on donnera son nom, et développera avec Wilhelm Weber le système d'unités électrostatiques et électromagnétiques dont on se sert encore aujourd'hui à l'occasion^e. Gauss concevra vers 1833 une nouvelle instrumentation très sensible et fiable pour mesurer les différents paramètres du champ magnétique terrestre ; sa méthode de détermination de l'intensité absolue du champ magnétique est une adaptation de celle de Poisson. Ces instruments auront un succès immédiat : ils sont déjà décrits dans un cours de physique de l'École polytechnique publié en 1840⁴². Cependant, ceux d'Arago seront utilisés à l'Observatoire de Paris jusqu'en 1855. On les remplacera alors par un magnétomètre anglais de Brooke à enregistrement photographique, qui se révélera peu sensible, puis en 1863 par les instruments de Gauss⁴³. Ces derniers seront encore en usage au milieu du xx^e siècle.

Les variations diurnes du champ magnétique terrestre

Arago a travaillé sur tous les aspects de la variation du champ magnétisme terrestre. Ses mesures systématiques de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques sont encore précieuses pour étudier sa variation à long terme, que l'on appelle la variation séculaire. Elles avaient évidemment à l'époque leur utilité pour la navigation à la boussole. Arago étudie également les faibles variations annuelles découvertes par Cassini IV : en gros, l'aiguille aimantée rétrograde vers l'Est entre l'équinoxe de printemps et le solstice d'été, puis se décale vers l'Ouest pen-

^e Le système de Gauss est remplacé dans l'enseignement par le système international MKSA, mais est encore utilisé par beaucoup de physiciens ; 1 gauss = 10⁻⁴ tesla.

dant les neuf autres mois. Cependant, ses mesures ne concordent pas avec celles de différents savants anglais et américains. On ne comprend pas à l'époque la raison de ces différences, et aujourd'hui encore on ne sait toujours pas bien ce qu'est cette variation annuelle, dont le comportement est capricieux.

Plus intéressants sont les résultats d'Arago sur les variations diurnes, auxquelles il consacre des efforts considérables puisqu'il fait lui-même en moyenne onze observations par jour, commençant à 7 heures du matin et se terminant à 11 heures du soir. Souvent, il observe encore plus tôt ou plus tard, se privant ainsi de plusieurs heures de sommeil. Il n'y a de lacune systématique que le lundi après-midi de 2 heures à 6 heures, horaire de la séance hebdomadaire de l'Académie des sciences. Humboldt écrit en 1830⁴⁴:

« Le travail le plus précis et le plus important qu'on ait jamais entrepris sur les phénomènes du magnétisme terrestre, et particulièrement des mouvements horaires de l'aiguille et la perturbation qu'éprouve ce mouvement par des aurores boréales et des tremblements de terre dans les contrées les plus éloignées, est le travail suivi par M. Arago, à l'Observatoire royal de Paris, pendant un si grand nombre d'années. Les physiciens attendent avec impatience la publication de ses résultats. »

Arago fait ainsi la synthèse de ses observations :

« Chaque jour, l'aiguille aimantée [indique] deux déclinaisons maxima et deux déclinaisons minima, de la manière suivante :

- 1. À partir de onze heures du soir, la partie Nord de l'aiguille marche de l'Occident à l'Orient, atteint une déclinaison minimum à huit heures et quart du matin, et rétrograde ensuite vers l'Occident pour atteindre sa déclinaison maximum à une heure un quart [de l'après-midi] ;*
- 2. À partir d'une heure et quart, l'aiguille marche de nouveau vers l'Orient, atteint un second minimum entre huit et neuf heures du soir, et revient ensuite vers l'Occident pour atteindre son second maximum à onze heures du soir. »*

Il définit l'amplitude de la variation diurne comme la différence entre la déclinaison maximum et la déclinaison minimum (cette différence varie entre 3 et 17 minutes de degré) ; il en prend la moyenne mensuelle et constate que la variation diurne est maximale en avril, et minimale en

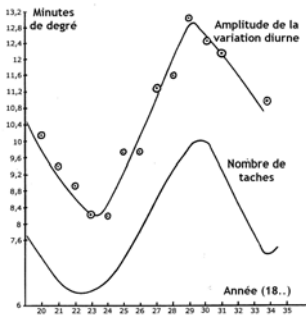


Figure 9.15. Variation de 1820 à 1835 de l'amplitude de la variation diurne de la déclinaison magnétique.

Elle est présentée dans la courbe du haut, tandis que la courbe inférieure représente la variation du nombre de taches solaires (nombre de Wolf). La corrélation est remarquable. D'après Le Mouél (2006).

décembre, mais qu'il y a de grandes variations d'année en année. Malheureusement il n'a pas l'idée de porter ses moyennes annuelles sur un graphe (cela ne se faisait pratiquement jamais à l'époque), ce qui lui aurait permis de voir facilement qu'elles varient de façon systématique avec l'activité solaire, que l'on commence à mesurer en comptant le nombre de taches (figure 9.15). Plusieurs observateurs ont observé par ailleurs cette corrélation, et Arago, qui à la fin de sa vie a confié à Barral l'examen du problème, la retrouve finalement lui aussi⁴⁵. Mais il reste prudent :

« Si la coïncidence des périodes des deux phénomènes n'a pas été seulement fortuite, ce que des observations ultérieures décideront, ce sera là une belle découverte dont l'influence sur les progrès de la physique terrestre pourra être considérable ; mais attendons avant de nous prononcer définitivement. »

Pourtant l'astronome suisse Rudolph Wolf avait écrit en août 1851 à Arago⁴⁶ :

« Les nombres de taches et les variations moyennes en déclinaison [magnétique] sont soumis, non-seulement à la même période de 10 1/3 ans, mais ces périodes correspondent jusqu'au moindre détail, de manière que les nombres des taches arrivent à leur maximum à la même époque que les variations. »

Les mesures d'inclinaison d'Arago ont donné des résultats moins intéressants. Quant aux mesures d'intensité qu'il a compilées ou faites lui-même, elles avaient surtout pour but de savoir si cette intensité varie ou non avec l'altitude, une question qui a beaucoup préoccupé les chercheurs de l'époque. La réponse est incertaine car l'effet, s'il existe, est faible devant les corrections de température qu'il est nécessaire d'apporter à l'aimantation de l'aiguille qui sert à la mesure lors des ascensions en ballon ou sur des montagnes.

Champ magnétique et aurores boréales

On a remarqué depuis longtemps que la boussole s'affole quand apparaissent des aurores boréales (on en voit quelquefois à Paris). Cassini IV écrit à ce sujet⁴⁷ :

« Parmi les causes perturbatrices de la variation diurne, les aurores boréales sont, sans doute, les plus fortes ; leur

effet dérange absolument la direction des aiguilles aimantées qu'elles agitent en tous sens, et d'une manière plus ou moins grande, selon la force et l'étendue du phénomène. Les aiguilles semblent même quelquefois en sentir l'effet d'avance, et quelquefois aussi cet effet se prolonge après le phénomène. »

Il est curieux de voir Arago s'approprier en partie cette découverte⁴⁸ ; mais il est vrai qu'il a fait beaucoup plus d'observations que Cassini IV, et qu'elles sont meilleures. Il se renseigne sur les aurores boréales invisibles à Paris, et constate qu'elles affectent aussi le magnétisme terrestre. Il écrit :

« On a vu que j'avais non seulement montré, comme mes prédécesseurs, qu'il y avait certaines coïncidences entre la direction de l'aiguille aimantée et les principales dispositions des aurores boréales, mais encore que j'avais découvert, dès 1819, que ce phénomène influait sur les mouvements de l'aiguille aimantée. [...] J'ai recueilli avec soin, pendant plus de dix ans, toutes les observations d'aurores boréales pour les rapprocher de mes observations de déclinaison, d'inclinaison et d'intensité. J'ai trouvé ainsi que les trois principaux phénomènes de l'aiguille aimantée étaient influencés par les aurores boréales, et que les actions constatées s'exerçaient lors même que les aurores étaient invisibles dans le lieu de l'observation. Les résultats que j'avais obtenus furent contestés par plusieurs physiciens ; c'est la loi invariable que doivent subir toutes les découvertes. »

Parmi les contestataires, Arago mentionne un savant anonyme d'Edinburgh, où l'on reconnaît aisément son ennemi Brewster, dont les critiques lui déplaisent fort. Il réplique :

« [Mon] travail se compose maintenant [en 1828] de plus de 60 000 observations. Toutes les fois que des affaires m'ont forcé de m'absenter, plusieurs de mes amis ont eu la complaisance de me remplacer. [...] Si la critique veut entrer en concurrence avec moi, si elle veut aussi faire des prédictions, je lui enverrai très-volontiers les trois talismans dont je me suis servi, savoir, un fil de soie écrue, une aiguille aimantée et un microscope ; il ne me restera plus alors qu'à lui souhaiter de la santé, du zèle et une forte dose de patience. [...] Quant à lui [Brewster], comme il a parfaitement le sentiment de son propre mérite, il pourra se consoler en se rappelant qu'Homère sommeillait aussi quelquefois. »

L'origine du champ magnétique terrestre

Comme à l'ordinaire, Arago ne se pose pas beaucoup de questions sur l'origine des phénomènes qu'il observe. C'est excusable, car ils ne peuvent en aucun cas être expliqués à l'époque. À la fin du *xvi^e* siècle, William Gilbert considérait la Terre comme un gigantesque aimant : mais quel est le matériau magnétique, et comment expliquer les variations du champ magnétique ? Deux cents ans plus tard, les choses n'avaient guère avancé. Mais, dès la découverte de l'électromagnétisme, Ampère suggère que des courants électriques dirigés d'Est en Ouest sur la surface du globe pourraient être la cause du magnétisme terrestre, une idée aussitôt reprise par Barlow. Ampère imagine aussi que ces courants sont formés par des sortes de piles dont les conducteurs seraient les filons métalliques, mais évidemment ça ne marche pas : il existe bien de tels courants telluriques, mais ils sont bien trop faibles pour engendrer le magnétisme terrestre.

Nous savons aujourd'hui que l'essentiel du champ magnétique terrestre provient de courants électriques qui circulent dans la partie liquide du noyau métallique de la Terre, laquelle s'étend de 1 200 à 3 400 km de rayon. Ces courants sont créés par la rotation de cette zone, qui fonctionne comme une dynamo auto-entretenu. Des instabilités encore mal comprises, probablement liées à la turbulence, font que l'intensité et la géométrie de ce champ magnétique varient lentement au cours du temps, ce qui produit la variation séculaire de la déclinaison magnétique. Le champ magnétique s'est d'ailleurs inversé de nombreuses fois dans l'histoire de la Terre, la dernière inversion ayant eu lieu il y a 800 000 ans⁴⁹.

Il existe aussi des courants électriques dans l'environnement lointain de la Terre, la magnétosphère⁵⁰. Cette région (figure 9.16) est modelée par le gaz qui arrive du Soleil à 400 km par seconde : le vent solaire. La rotation de la Terre au centre de cette magnétosphère, qui ne tourne pas avec elle, produit les variations diurnes du champ magnétique qu'Arago a étudiées avec tant de détail. Les variations du vent solaire au cours du temps, qui sont liées à l'activité du Soleil, occasionnent des changements dans les courants qui circulent dans la magnétosphère, donc dans le champ magnétique terrestre. On n'est donc pas surpris de constater que

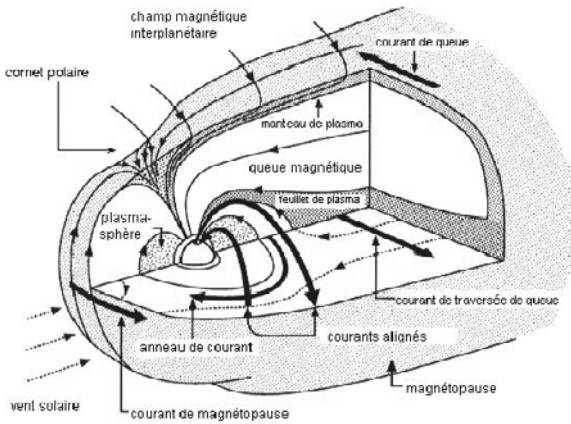


Figure 9.16. La magnétosphère terrestre. La Terre est la petite sphère centrale. La magnétosphère est un ensemble très complexe de milieux ionisés (plasma) plongés dans le champ magnétique terrestre, qui est fortement perturbé par l'arrivée du vent solaire qui contient lui même un champ magnétique (le champ magnétique interstellaire). Divers courants électriques circulent comme indiqué dans les milieux ionisés conducteurs. Les variations du vent solaire liées à l'activité du Soleil affectent ces courants, produisent les variations observées par Arago dans le champ magnétique à la surface de la Terre, et engendrent aussi des précipitations d'électrons dans les régions polaires, qui donnent les aurores boréales et australes.

l'amplitude des variations diurnes du champ magnétique soit liée à l'activité solaire, comme on l'a vu dans la figure 9.15. Enfin, les bouffées de particules chargées de haute énergie qui arrivent dans la magnétosphère à la suite d'éruptions à la surface du Soleil induisent de profonds changements dans la magnétosphère. Des électrons sont précipités dans l'atmosphère des régions polaires de notre globe, en suivant les lignes de force du champ magnétique ; l'ionisation qu'ils y produisent est suivie d'une recombinaison des ions et des électrons ainsi libérés, qui est à l'origine de ces émissions lumineuses que sont les aurores boréales ou australes. On réalise ainsi pourquoi les aurores sont accompagnées de variations erratiques du champ magnétique qui affolent les boussoles sur la Terre tout entière. Il a fallu presque tout le xx^e siècle et beaucoup de lancements de satellites artificiels pour que l'on parvienne à comprendre ces phénomènes complexes, dont certains aspects sont encore peu clairs.

Une vue synoptique du champ magnétique terrestre

Les voyageurs ont depuis longtemps observé que la déclinaison magnétique dépend de la longitude et de la latitude, et ils vont commencer, à la fin du $xviii^e$ siècle, à faire des mesures systématiques de la déclinaison, de

manière à en faire bénéficier leurs successeurs. Arago recommande, à la suite de Humboldt, de faire de nouvelles mesures chaque fois que l'occasion s'en présente. Évidemment ces mesures n'ont pas la précision que l'on pourrait obtenir dans un cabinet magnétique, mais, si l'on n'est pas trop exigeant, la déclinaison mesurée avec une simple boussole orientée par rapport à l'étoile polaire peut suffire, pourvu que l'on ait corrigé les lectures de la boussole des perturbations causées par le fer ou l'acier présents sur le navire. Arago et Humboldt seront entendus, et en 1836 le capitaine de frégate Duperrey pourra présenter une carte magnétique du globe (figure 9.17). De leur côté, Gauss, Weber et leurs amis ont créé un *magnetischer Verein* (société magnétique) dont le but est de favoriser les mesures magnétiques dans les

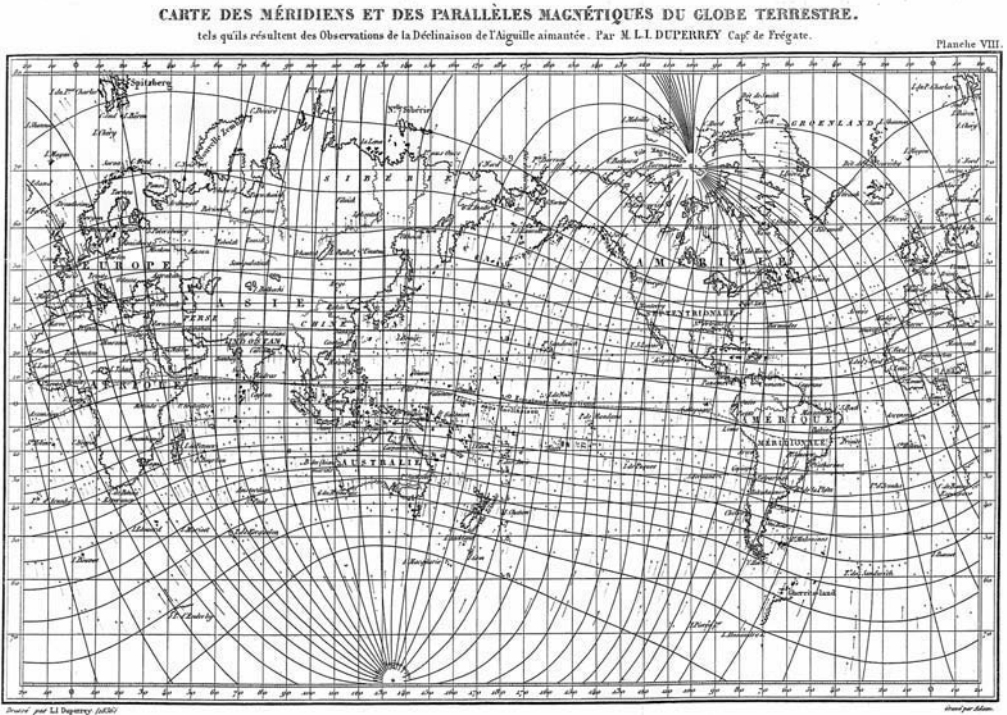


Figure 9.17. La carte du champ magnétique de la Terre vers 1836. Elle montre les méridiens magnétiques le long desquels s'oriente l'aiguille aimantée, et les parallèles magnétiques qui leur sont perpendiculaires. Cette carte a été construite à partir de mesures de la déclinaison magnétique en de nombreux lieux, indiquées par de petites flèches, surtout en mer lors des voyages du capitaine Duperrey et d'autres navigateurs.

différentes régions du globe et de construire des cartes du même genre. Humboldt, qui connaît bien Gauss et lui a d'ailleurs présenté Weber, participe à l'aventure en mesurant systématiquement le champ magnétique lors de son voyage de l'Oural à la Chine en revenant par la mer Caspienne, et en faisant construire dans le parc de son château à Berlin « *une petite maison entièrement dépourvue de fer, semblable à celle de l'observatoire royal de Paris* », où une série régulière d'observations de la déclinaison commence le 5 février 1829⁵¹. L'allemand Adolf Kupfer, qui travaille en Russie, a monté lui aussi un observatoire magnétique et obtenu de divers gouvernements l'établissement d'autres observatoires semblables. Cependant, la carte de la déclinaison de Gauss et de Weber publiée en 1840 paraît moins bonne que celle de Duperrey, bien qu'elle ait été construite par une procédure nouvelle utilisant les harmoniques sphériques, faute sans doute d'un nombre suffisant d'observations⁵². Quoiqu'il en soit, les mesures magnétiques sont maintenant presque aussi répandues et en tout cas aussi soutenues que les mesures météorologiques.

Géophysique : la température de la Terre

Arago avait certainement fait connaissance avec l'œuvre de Joseph Fourier (figure 9.18 ; encadré 9.2), son prédécesseur en tant que secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, même s'il ne pouvait peut-être pas en suivre les développements mathématiques extrêmement novateurs. Arago va s'en inspirer à propos d'une question qui préoccupe beaucoup les savants de l'époque : celle de la température du globe terrestre. Le point qui l'intéresse le plus est la variation du climat à long terme ; il écrit dans son très long *Mémoire sur l'état thermométrique du globe*⁵³ :

« *L'état thermométrique du globe varie-t-il avec la suite des siècles ? Les variations affectent-elles la masse entière des substances dont notre Terre est formée ? Doit-on croire, au contraire, qu'elles n'ont lieu qu'à la surface ? Dans l'un comme dans l'autre des cas, a-t-on quelque preuve que depuis les temps historiques les changements de température ont été sensibles ?* »



Figure 9.18. Joseph Fourier (1768-1830).

Encadré 9.2. Joseph Fourier ⁵⁴

Né dans une famille pauvre et orphelin de bonne heure, Joseph Fourier est instruit par les Bénédictins à l'École militaire d'Auxerre. Il est destiné à l'état ecclésiastique, mais ses dons en mathématiques sont tels qu'il est nommé professeur dans cette école à l'âge de 16 ans. Il fait partie en 1794 de la première promotion de l'École normale supérieure. Il est remarqué par Legendre et par Monge, et prend part à l'expédition d'Égypte. Il devient secrétaire de l'Institut d'Égypte et rédige l'introduction de la *Description de l'Égypte*. Napoléon le nomme en 1802 préfet de l'Isère, poste qu'il occupe à la satisfaction générale jusqu'à la Restauration, qui le destitue et le laisse sans ressources. Heureusement, le Préfet de Paris, M. de Chabrol, qui l'estime, lui trouve un emploi au Bureau de la statistique de la capitale. Il est élu en 1817 à l'Académie des sciences dont il devient secrétaire perpétuel en 1822, puis à l'Académie française en 1826. C'est à Grenoble, aux rares heures de liberté que lui laisse sa charge préfectorale, qu'il élabore sa théorie analytique de la chaleur, tout en vérifiant ses idées par des expériences. Les développements mathématiques de Fourier sont peu estimés par Lagrange, par Laplace et par d'autres, car ils ne sont pas toujours rigoureux mais visent à un résultat utile ; ils sont cependant si novateurs que la consécration finira par venir. Les travaux de Fourier sur les séries trigonométriques sont à l'origine de remarquables développements en physique mathématique au xx^e siècle, au point qu'on peut le considérer comme le fondateur de cette discipline.

Sous-jacente est la question de l'âge de la Terre. Bien sûr, les scientifiques ne croient plus depuis au moins un siècle à la chronologie biblique qui place la création seulement quelques millénaires en arrière, mais ils voudraient savoir par quelle échelle de temps la remplacer. Mais lisons d'abord Fourier, qui donne dans son mémoire de 1824 une introduction limpide à cette question :

« La chaleur du globe terrestre dérive de trois sources qu'il est d'abord nécessaire de distinguer.

1° La terre est échauffée par les rayons solaires, dont l'inégale distribution produit la diversité des climats.

2° Elle participe à la température commune des espaces planétaires, étant exposée à l'irradiation des astres innombrables qui environnent de toutes parts le système solaire.

3° La terre a conservé dans l'intérieur de sa masse une partie de la chaleur primitive, qu'elle contenait quand les planètes ont été formées. »

Puis Fourier entreprend d'évaluer l'importance de ces trois sources. Nous avons déjà parlé de la première, qui est de loin la plus importante et dont il étudie en détail les effets, car il est fier que sa théorie mathématique de la chaleur ait réussi à les expliquer complètement : variations diurnes de la température de la couche superficielle du sol, et variations annuelles jusqu'à des profondeurs plus grandes, qui s'estompent complètement au delà. Arago s'est employé à mesurer ces variations annuelles, en disposant des thermomètres à différentes profondeurs dans le sol des jardins de l'Observatoire. On ne connaît ces observations que parce qu'elles ont été insérées dans la *Théorie mathématique de la chaleur* de Poisson⁵⁵, mais elles semblent avoir été faites avec beaucoup de soin à l'aide de thermomètres très longs (2 à 8 m) dont la graduation se lit sur la partie émergée ; ceci nécessite une correction car il y a toute une gamme de températures le long de la colonne de liquide. Arago annonce des résultats provisoires : une différence de température entre l'été et l'hiver de 1,414°C à 8,121 mètres de profondeur, etc. (la précision qu'il donne pour ces nombres est totalement illusoire !). Quoi qu'il en soit, la température en profondeur est fixe, mais, d'après Fourier « elle est très différente dans les différents climats : elle résulte de l'action perpétuelle des rayons solaires et de l'inégale exposition des parties de la surface, depuis l'équateur jusqu'aux pôles ».

Fourier tente d'évaluer l'importance de la deuxième source, c'est-à-dire « les espaces planétaires », en remarquant que la température de cette source doit être inférieure à celle des régions polaires car celles-ci sont quand même un peu chauffées par le Soleil. Mais, d'après lui, elle ne peut être beaucoup inférieure, car sinon « les régions polaires subiraient un froid immense » : il estime que la température du ciel est de -50° à -60°C, ce qui correspond sensiblement aux températures les plus basses enregistrées en Sibérie. De son côté, Pouillet, dans son mémoire de 1838, arrive à -142°C ; mais il pense que le rayonnement de l'espace est presque aussi efficace que

celui du Soleil pour chauffer la surface de la Terre, ce qui est strictement impossible si sa température est aussi basse ; mais il est vrai qu'il ignore les lois du rayonnement découvertes bien plus tard par Planck. Fourier et Pouillet se trompent tous les deux sur la température du ciel. L'ensemble du rayonnement électromagnétique dans lequel baigne la Terre est maintenant connu : si l'on fait abstraction de ce qui vient du Soleil, il est dominé par le rayonnement fossile de l'Univers qui est celui d'un corps noir à 2,725 degrés absolus, soit -270°C . Le fond des cratères polaires de la Lune, qui ne voient jamais le Soleil, doit être à une température à peine supérieure ; en soignant l'isolation thermique, on peut dans les satellites artificiels refroidir des surfaces par rayonnement vers l'Univers jusqu'à des températures extrêmement basses, de l'ordre d'une dizaine de degrés absolus. Fourier, et avec lui tous ses contemporains, ont donc très fortement surestimé la température de l'Univers. Certes ils étaient conscients du fait que les vents et les courants marins tendent à homogénéiser la température des différentes parties du globe, mais leur effet sur la température des régions les plus froides est bien plus grand qu'il ne le pensaient.

En revanche, Fourier fait une estimation correcte de l'importance de la troisième source de chaleur de la surface du globe : l'intérieur même de la Terre, dont les volcans et les sources thermales montrent qu'il est chaud. Au XVIII^e siècle, on pensait que c'était l'effet dominant. Arago en dit : « *Mairan, Buffon, Bailly évaluent, pour la France, la chaleur qui s'échappe de l'intérieur de la Terre, à 29 fois en été, et à 400 fois en hiver, celle qui nous vient du Soleil.* » En effet, Buffon, mettant à profit son expérience de maître de forges, avait étudié la vitesse de refroidissement de boulets métalliques de différents diamètres. Extrapolant ces données à la Terre, qu'il considérait avoir été à l'origine une masse incandescente, il avait estimé que le globe aurait mis environ 76 000 ans pour parvenir à sa température actuelle⁵⁶. Ce résultat ne lui posait pas de problèmes car on ignorait totalement quelles étaient les échelles de temps des phénomènes terrestres, tout en soupçonnant qu'elles étaient bien plus longues que les quatre millénaires résultant de la généalogie biblique. Buffon prévoyait que, le refroidissement continuant, la Terre deviendrait dans quelques dizaines de milliers d'années un globe gelé où cesserait toute vie.

Arago continue : « *Mais l'ingénieur roman auquel [cette idée] sert de base s'est dissipé comme un fantôme devant la sévérité des calculs mathématiques.* » En effet, Fourier sait maintenant calculer de façon irréfutable le flux de chaleur (pour parler en termes modernes) provenant de l'intérieur de la Terre, à partir de la valeur de l'augmentation de la température quand on s'enfonce dans le sol et d'une estimation de la conductibilité thermique du sol. Avec un accroissement de 1°C par 30 ou 40 mètres, il estime que « *l'excès de température que la surface terrestre a présentement en vertu de cette source intérieure est très petit [par rapport à la température qui résulte de l'échauffement par le Soleil] ; il est vraisemblablement au-dessous d'un trentième de degré centésimal.* » La théorie prévoit que cette valeur a été bien plus élevée autrefois, qu'elle décroît de manière exponentielle^f, et « *que l'excès actuel de la température [...] ne peut que diminuer pendant un temps indéfiniment prolongé* ». En fait, il existe une source permanente de chaleur dans la Terre : la radioactivité de l'uranium et d'autres éléments, et cette diminution sera encore moins grande. Mais ceci ne modifie pas la conclusion de Fourier : la chaleur interne de la Terre ne joue aujourd'hui qu'un rôle négligeable dans le bilan thermique de la surface.

Arago est visiblement convaincu par cette démonstration et va s'employer pendant toute sa vie à accumuler les mesures de l'accroissement de température lorsqu'on s'enfonce dans le sol. On les trouve dans de nombreuses publications, notamment dans son mémoire sur les « *puits forés* »⁵⁷. En réalité, il ne peut guère améliorer ainsi l'estimation de Fourier, dont la principale incertitude réside dans la conductibilité thermique du sol : une fois de plus, Arago s'est laissé entraîner par son goût de l'histoire et de la compilation.

D'autres n'avaient pas lu Fourier, ou ne l'avaient pas compris. Par exemple, Élie de Beaumont se place encore en 1844 dans la lignée de Buffon dans sa *Note sur le rapport qui existe entre le refroidissement progressif de la masse du globe terrestre et celui de sa surface*⁵⁸. En oubliant le rayonnement solaire, il estime à 38 000 ans le temps de refroidissement de la Terre, ce qui lui pose quand même des problèmes car « *la sphère de la géologie s'est considérablement*

^f Ce terme n'est pas utilisé par Fourier, ni celui de progression géométrique : mais il est clair qu'il avait bien compris la forme de la loi du refroidissement.

agrandie » depuis Buffon ou, en d'autres termes, l'échelle des phénomènes géologiques paraît maintenant bien plus longue que celle de cette époque.

Une autre façon d'estimer le temps de refroidissement de la Terre est de recourir à l'astronomie, et ici Arago est à son affaire ... encore que le raisonnement soit de Laplace⁵⁹. Il constate que la durée du jour, telle qu'on peut la rapporter au mouvement de la Lune dont on peut admettre qu'il n'a pas changé depuis l'Antiquité, n'a pas varié de plus de 1/100 de seconde depuis Hipparque (Laplace écrit même : moins de 1/380 de seconde). Donc, en raison de la conservation du moment angulaire, les dimensions de la Terre n'ont pas pu beaucoup changer sous l'effet d'une variation de sa température⁶⁰. Admettant que le coefficient de dilatation de la Terre est le même que celui du verre, Arago en déduit que la variation de la température de la masse générale n'a pas varié de plus de 1/170 de degré Celsius depuis l'Antiquité, ou, si l'on tient compte des incertitudes qui sont grandes, de plus 1/10 de degré. Ceci implique cette fois — mais Arago ne va pas jusque là — une échelle de temps qui se compte en millions d'années.

Véritable précurseur de la paléoclimatologie, Arago s'interroge sur l'évolution à long terme des paramètres de l'orbite terrestre et leur influence éventuelle sur le climat. Il ne peut guère s'agir que d'une variation de l'excentricité de l'orbite, dont il sait qu'elle existe. Arago en conclut que l'effet est faible, mais il ne raisonne que sur quelques millénaires alors que nous savons maintenant qu'il est important sur de plus longues périodes.

À court terme, Arago s'intéresse aux changements climatiques en utilisant les mesures de température. Il est conscient des difficultés de cette étude, difficultés que nous avons déjà mentionnées puisque les thermomètres

⁵⁹ Le problème des dimensions de la Terre préoccupe Arago pour d'autres raisons. Citons Tisserand (1893), p. 6 : « *On sait que [...] la France a pris l'initiative du système métrique, et en a fait une chose internationale, en rattachant le mètre à la grandeur de la Terre. Mais, notre globe se refroidit et se contracte peu à peu dans la suite des siècles, si bien que notre unité de longueur se trouve exposée à de légers changements. Arago avait pensé qu'en étudiant minutieusement la lumière qui nous parvient du soleil et des étoiles, on pourrait y trouver une unité de longueur plus constante, rattachée non plus à la Terre, mais aux astres, un mètre en quelque sorte sidéral.* » Il s'agit évidemment de lier la définition du mètre à une longueur d'onde ou à la vitesse de la lumière.

n'ont été étalonnés qu'au début du XVIII^e siècle. Il examine donc les changements climatiques à partir des récoltes et de divers phénomènes naturels (congélation des rivières, etc.). Il compile une multitude de données qu'il examine souvent, mais pas toujours, d'une manière critique : elles vont de l'existence d'hivers doux ou rigoureux en différents points du globe, à la température interne de différentes espèces d'animaux. Mais il n'y a guère là qu'une accumulation d'observations qu'il n'analyse pas vraiment.

Océanographie⁶⁰

On se souvient que ce sont les succès maritimes de l'Angleterre et l'existence de son *Board of longitudes* qui ont incité l'abbé Grégoire à décider la création du Bureau des longitudes français. Connaissant l'attachement d'Arago au Bureau et son intérêt constant pour les affaires de la mer, dont il saisit très bien le poids économique et militaire, on ne s'étonne pas des efforts qu'il a fait pour en comprendre la physique. Nous verrons plus loin ses efforts pour créer des observatoires nautiques, puis pour promouvoir les phares et les lentilles de Fresnel. Il connaît l'importance des cartes marines, et soutient de toutes ses forces le corps des ingénieurs hydrographes, au nombre de vingt, que l'on voulait réduire dès que la carte des côtes de France serait terminée. Dans son discours à la Chambre du 5 juin 1837, il affirme⁶¹ :

« M. le rapporteur de la commission sait aussi bien que moi que les travaux hydrographiques sont la toile de Pénélope, que c'est toujours à recommencer. [...] Parmi les corps entretenus par l'État, il en est un qui [...] fait, lui, beaucoup de besogne et peu de bruit. Le corps dont je veux parler est celui des ingénieurs hydrographes. [...] Il y a en France vingt ingénieurs hydrographes ou élèves. Dans ce nombre figurent un ingénieur en chef, M. Beautemps-Beaupré, et un ingénieur en chef adjoint, M. Daussy. [...] L'ingénieur en chef reçoit 7 000 fr. ; l'ingénieur en chef adjoint, 5 000 fr. Vous le voyez, les ingénieurs hydrographes ne sont pas richement rétribués. »

Le même jour, il dénonce « l'antipathie contre la science d'une partie de l'administration de la marine », qui ne s'intéresse pas aux observations scientifiques que l'on peut

faire lors des voyages en mer ; puis il insiste pour que des observations des marées soient faites de façon permanente dans un grand nombre de ports, comme c'est le cas en Angleterre, et avec des « machines » enregistreuses⁶². Il aura gain de cause.

La détection des écueils

Esprit pratique, Arago réalise que l'utilisation de la polarisation peut améliorer la visibilité des écueils par les marins. Il sait depuis longtemps que la réflexion par une surface non métallique polarise la lumière, et que cette polarisation peut être totale pour une certaine incidence liée à l'indice de réfraction, l'incidence de Brewster (pour l'eau, l'angle du rayon incident avec l'horizontale est alors de 37°). Si l'on regarde sous cet angle cette surface réfléchissante à travers un polariseur, par exemple une lame de tourmaline, elle paraît beaucoup plus sombre. Ce peut être la surface de la mer ; dans ce cas, un écueil qui affleure ne présente pas ou peu de polarisation et apparaît avec plus de contraste. Cette méthode très simple a-t-elle été employée dans la pratique ? On peut en douter, car il faut avoir pensé à embarquer une lame de tourmaline... Mais les automobilistes savent bien que des lunettes polarisantes atténuent beaucoup la lumière aveuglante réfléchie par la route lorsqu'on a le soleil en face, et permettent ainsi de mieux voir les obstacles et les autres véhicules.

Les courants

Les marins connaissent depuis longtemps le Gulf Stream, ce courant chaud qui part de la mer des Sargasses pour se perdre au Nord de la Norvège et qu'a bien représenté Franklin (figure 9.19). Pendant son voyage en Amérique du Sud, Humboldt a décrit un autre courant, froid celui-ci, qui remonte le long de la côte du Chili et du Pérou. Bien qu'il ne l'ait pas découvert, car il était connu des indigènes, on lui a donné son nom. D'autres courants avaient été identifiés sur le globe par les navigateurs espagnols, portugais, hollandais et anglais, mais ils étaient difficiles à cartographier en raison de l'incertitude sur les longitudes. Lorsque la détermination des longitudes s'est améliorée grâce aux chronomètres transportables, les marins ont pu mieux connaître les courants en étudiant la dérive qu'ils

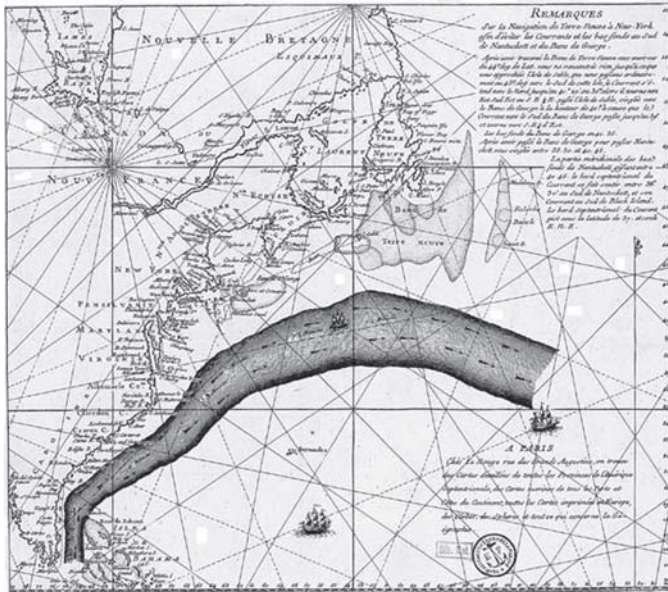


Figure 9.19. Une des premières représentations scientifiques du Gulf Stream, par Benjamin Franklin et Timothy Folgen (1785). Leur première carte date de 1769-70.

occasionnent sur leurs navires. On voit alors en appaître de bonnes descriptions, comme celles du major anglais James Rennell en 1799 pour l'Atlantique, puis des cartes couvrant tout le globe comme celle du même Rennell en 1832 et celle du capitaine Duperrey en 1838 (figure 9.20).

Cependant Arago trouve la situation encore peu satisfaisante. Certes le Gulf Stream est si bien connu que le colonel Jonathan Williams, neveu de Franklin qui avait travaillé avec lui, a pu écrire en 1799 un traité de « *Navigation thermométrique* » qui permet de se baser sur la température de la mer pour connaître la longitude. Mais Arago regrette dans ses *Instructions pour la Bonite* que d'autres courants ne soient pas bien cartographiés. Mais surtout, il constate que l'origine des courants océaniques est très mal comprise. On l'attribue tantôt aux vents, principalement les alizés, tantôt à la dilatation de la mer sous l'effet de son échauffement par le rayonnement du Soleil dans les régions équatoriales, ce qui élèverait son niveau (cette dernière hypothèse sera encore reprise en 1847 par Babinet, de façon assez naïve⁶³). Arago, qui a de grandes compétences sur les différents aspects du problème, met à mal l'idée de la création des courants par des différences de niveau, car les topographes français n'ont rien vu de tel en Floride qui puisse expliquer le départ du Gulf Stream ; il ne croit guère non plus — mais ici il a tort — à l'effet des

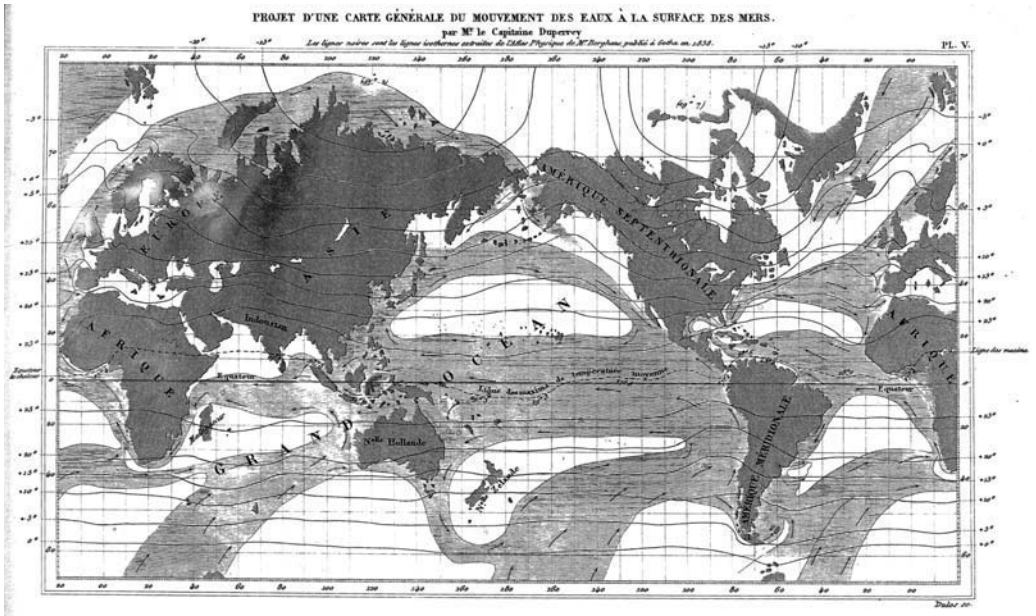


Figure 9.20. Carte générale des courants marins, par le capitaine Duperrey. Les courants sont en grisé, avec des flèches indiquant leur direction. La carte reproduit aussi, d'après Humboldt, les lignes d'égalité température moyennée sur l'année (comparer à la figure 9.4).

vents⁶⁴. Il émet aussi une idée très novatrice, mais qui est en réalité partiellement de Humboldt. Voici ce qu'écrivit ce dernier vers 1810⁶⁵ :

« Dans les mers des Tropiques, on trouve qu'à de grandes profondeurs, le thermomètre ne se soutient qu'à 7 ou 8 degrés centésimaux. [...] La température de l'air ne baissant jamais dans ces parages au-dessous de 19 à 20 degrés, ce n'est pas à la surface que les eaux peuvent avoir acquis un degré de froid si voisin du point de congélation et du maximum de densité de l'eau [à 4°C]. L'existence de ces couches froides dans les basses latitudes, prouve par conséquent un courant inférieur qui se porte du pôle vers l'équateur. »

Et voici Arago :

« La théorie des courants a fait peu de progrès jusqu'ici, parce qu'on s'est exclusivement attaché à ceux de ces phénomènes qui sillonnent la surface des mers. Des courants, engendrés par des différences de salure et de température, existent à toutes les profondeurs. Ce sont, par exemple, des courants en contact avec le lit même de la mer, qui transportent jusque

sous l'équateur les eaux froides des zones polaires. [...] Si je ne me trompe, c'est en se plaçant à ce point de vue ; c'est en descendant, par la pensée, aux plus grandes profondeurs de l'Océan ; c'est en appliquant à la mer la théorie qui a déjà rendu un compte satisfaisant des vents alizés, qu'on parviendra à débrouiller la question. »

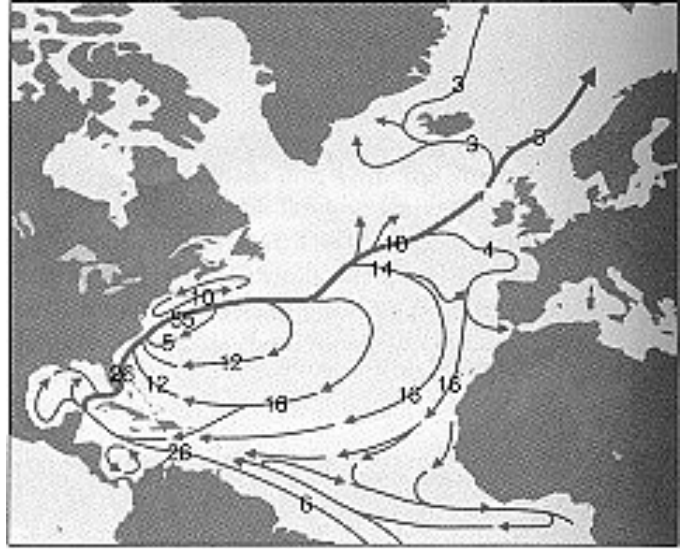
L'analogie avec les alizés montre qu'Arago a vu que les courants chauds qui se dirigent vers les hautes latitudes pourraient être compensés par des courants profonds froids en sens inverse. Il est possible que Humboldt l'ait subodoré, mais on n'en a pas la preuve. Il est difficile à l'époque de mettre directement en évidence ces courants profonds, mais Arago recommande aux navigateurs de faire des mesures systématiques de température et de salinité à différentes profondeurs, préfigurant ainsi l'océanographie moderne⁶⁶.

Bien sûr, nous en savons beaucoup plus aujourd'hui⁶⁷. Il est maintenant clair que les courants de surface, qui n'atteignent pas 400 m de profondeur, sont principalement créés par les vents (un vent soufflant pendant 10 heures entraîne un déplacement des eaux de surface à 2 % de sa vitesse). Arago n'y croyait pas, mais Humboldt l'avait compris⁶⁸. L'accélération de Coriolis tend à les dévier (vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'autre hémisphère), si bien qu'une partie de ces courants forme de grandes boucles circulaires, les *gyres*, dans les principaux bassins océaniques. Mais si un courant de surface chaud et riche en sel provenant des tropiques comme le Gulf Stream parvient à des latitudes élevées, l'eau en se refroidissant voit sa densité augmenter et s'enfonce dans l'océan. Un courant profond se crée en direction inverse du courant superficiel, comme l'avait entrevu Arago : sa comparaison avec la formation des alizés est donc bienvenue. Cependant, la présence de vents le long des côtes complique singulièrement cette image simple : ils provoquent selon les cas des remontées d'eau profonde ou au contraire l'enfoncement de l'eau superficielle. Les courants de l'Atlantique Nord donnent une bonne idée de ces phénomènes (figure 9.21).

Une méthode pour l'océanographie

Nous n'avons mentionné que quelques exemples de l'intérêt d'Arago pour la mer : il y en a bien d'autres, par

Figure 9.21. Les courants de surface dans l'Atlantique Nord. Le Gulf Stream est en trait épais. Les nombres indiquent des débits en millions de m^3 par seconde. D'après Lowell D. Scott, University of Southern California.



exemple son étude sur les courants dans le détroit de Gibraltar et les échanges entre la Méditerranée et l'Océan Atlantique, ou celle sur la salinité des différentes mers ouvertes ou fermées. Mais il manque de données⁶⁹. Il y a en effet de grandes lacunes dans les connaissances, que l'on pourrait en grande partie combler par des observations systématiques en mer. L'heure n'est pas encore au lancement de navires océanographiques — le premier sera le quatrième *Pourquoi-Pas?* de Jean-Baptiste Charcot, lancé en 1908 — et il faut se contenter d'observations faites à bord de bâtiments ayant d'autres fonctions. Arago est bien placé pour leur donner l'impulsion nécessaire, et fait aussi systématiquement partie des commissions chargées d'examiner les résultats de ces observations.

Dans ses instructions (Appendice 2), il met en évidence les lacunes et recommande particulièrement les observations susceptibles de les combler, mais sans délaisser les observations systématiques. En ce qui concerne par exemple les courants, il demande aux navigateurs de faire chaque demi-heure une mesure de la température en surface, mais aussi des mesures de la température à différentes profondeurs avec des « *thermométographes* », et des prélèvements d'eau profonde avec une « *bouteille à renversement* » conçue par Biot, dans le but d'en faire l'analyse et d'étudier les gaz dissous. Arago donne une description

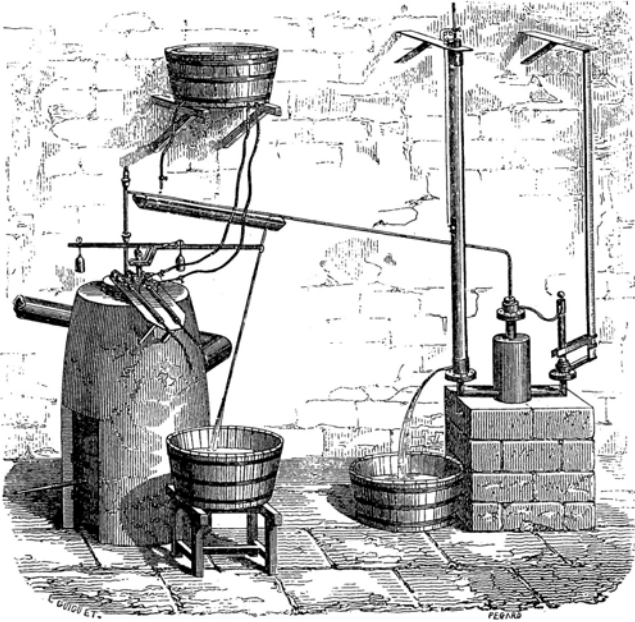
détaillée de l'instrument emporté par la Bonite⁷⁰. Et puis, pendant qu'on y est, pourquoi ne pas profiter des escales pour mesurer la hauteur des montagnes et faire diverses observations géophysiques et géologiques dont il donne la liste ?

Arago pense aussi au dépouillement et à l'exploitation scientifique de toutes ces données, dont il sait par expérience personnelle qu'ils demandent beaucoup de temps et d'efforts ; mais il ne peut guère être cité en exemple à ce propos. Toujours est-il qu'il signale dans ses comptes rendus de divers voyages la nécessité d'une « *prompte publication* » des résultats, pour que l'État ne soit pas « *éditeur de théories vieilles ou d'observations inutiles* ».

Si l'on examine l'œuvre d'Arago en tant que « *physicien de la mer* », on constate qu'il a des idées et des intuitions plus claires que celles de bien de ses prédécesseurs et de ses contemporains, à l'exception notable de Humboldt qui l'a beaucoup influencé. Il a aussi une approche globale des phénomènes, un sens développé de la mesure et de son analyse, et des qualités de persuasion qui ont certainement été pour beaucoup dans le développement de l'océanographie dans notre pays. On constate aussi son intérêt pour des problèmes qui sont devenus d'une actualité brûlante comme l'évolution du climat et ses relations avec les océans, sujet qui à l'époque n'intéresse pas grand monde. Mais, une fois encore, Arago s'arrête dès qu'il est question de théorie : c'est sans doute prudent dans les cas difficiles, mais n'est guère stimulant. Ce n'est qu'après sa mort que l'on commencera à construire des modèles mathématiques des courants marins, et la circulation océanique générale ne sera comprise qu'à partir de 1948, principalement grâce à l'américain Henry Stommel.

Chapitre 10

Vers la physique appliquée



L'appareil de Dulong et Arago pour la mesure de la force élastique de la vapeur d'eau.

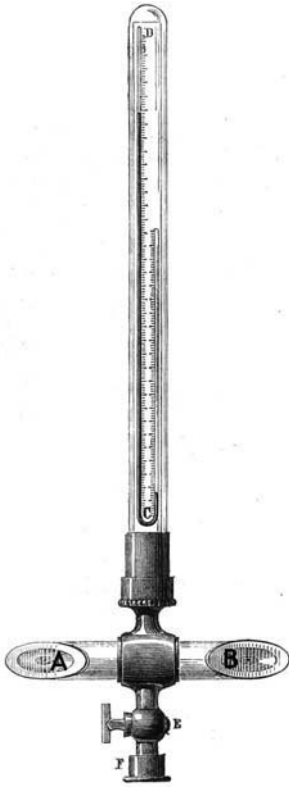


Figure 10.1. Le prisme de Biot et Arago pour mesurer l'indice de réfraction des gaz. La lumière entre en A dans une lame à face parallèle et sort en B à travers une autre lame, l'angle entre ces deux lames qui définissent un prisme creux, étant de 145° environ. On introduit le gaz dans ce prisme, et le baromètre situé au dessus en mesure la pression.

Les propriétés optiques des gaz

L'étude de la réfraction dans les gaz est la première activité scientifique professionnelle d'Arago, qu'il réalise avec Biot sous sa direction car en 1805, date à laquelle commencent les expériences, Arago est encore un tout jeune homme de 19 ans. Ces expériences ont un but astronomique : il est nécessaire de connaître avec précision la réfraction de la lumière par l'atmosphère terrestre afin de corriger de ses effets les mesures de la position des astres. Or on n'a jamais tenu compte de l'humidité de l'air, et on veut voir si elle affecte la réfraction. Borda avait commencé de telles mesures avant la Révolution, mais elles n'avaient pas abouti et il fallait les reprendre.

Les premières mesures

Biot et Arago travaillent avec le prisme creux qu'avait construit Borda et, pour mesurer la déviation que donne ce prisme rempli de différents gaz, avec le cercle répétiteur de Fortin représenté dans la figure 4.4¹. Le prisme (figure 10.1) est fait d'un tube de verre épais, dont les extrémités taillées en biseau très obliquement par rapport à l'axe sont bouchées par deux lames de verre à faces parallèles. On peut y introduire le gaz par un robinet, et un manomètre à mercure donne sa pression. Avec une des lunettes du cercle répétiteur placé en position horizontale, on vise une mire éloignée à travers le prisme (figure 10.2, position 1) ; puis on tourne celui-ci de 180° autour d'un axe vertical, de façon à ce que la déviation se fasse dans l'autre sens (figure 10.2, position 2). On vise à nouveau la mire avec la lunette à travers le prisme ainsi retourné. On obtient par différence de lecture entre les deux positions le double de l'angle de déviation du prisme, affecté par le gaz qu'il contient.

Le gaz étudié est soit de l'air sec, soit de l'air humide dont on estime le contenu en vapeur d'eau à l'aide d'un hygromètre à cheveu de Saussure, la température étant quant à elle mesurée avec des thermomètres précis construits et étalonnés par Gay-Lussac. L'indice de réfraction d'autres gaz : oxygène, azote, hydrogène, ammoniac, gaz carbonique, « *hydrogène carburé* » (méthane ?), « *hydrogène plus carburé que le précédent* » (éthane ?), est également mesuré. Biot et Arago avaient préalablement

mesuré la densité de ces différents gaz sous la pression atmosphérique (nous allons voir bientôt le but de ces mesures), en utilisant le dispositif simple représenté dans la figure 10.3 : on fait d'abord le vide dans le ballon, puis on le pèse. On y fait ensuite entrer le gaz sous la pression atmosphérique, d'où par différence le poids de ce gaz. Enfin on répète la même opération avec l'air, d'où la densité du gaz par rapport à l'air.

Les résultats de ces mesures de densité et d'indice de réfraction sont présentés par Biot d'abord au Bureau des longitudes, puis à la Première classe de l'Institut le 26 mars 1806. L'article correspondant aurait dû être signé par Biot et Arago, mais sur les épreuves vues par hasard, Arago découvre que son nom a disparu. Il proteste auprès de Poisson et de Thenard, qui trouvent sa réclamation légitime. Biot, qui prétend « *n'avoir effacé [son nom] que pour se conformer aux usages académiques qui, selon lui, ne permettraient pas que le nom d'un académicien fût accolé à celui d'une personne étrangère à l'Académie dans la collection des Mémoires que publie ce corps savant* », consent finalement à ajouter le nom d'Arago : une premier exemple des relations qui seront souvent tendues entre les deux hommes. Le mémoire sera effectivement publié sous le nom des deux auteurs², avec le titre pittoresque de *Mémoire sur les affinités des corps pour la lumière, et particulièrement sur les forces réfringentes des différents gaz*.

Un des résultats, publié par Biot seul (encore !) dans un autre mémoire³, est que la vapeur d'eau influe très peu sur l'indice de réfraction de l'air ; et voilà les astronomes rassurés, dont Delambre qui fait grand cas de ce travail. Mais les conclusions que nos deux hommes déduisent de leurs mesures de l'indice de réfraction des différents gaz vont bien surprendre les contemporains, comme nous allons le voir.

Le pouvoir réfringent : une pierre dans le jardin de Newton

Tout le monde à cette époque, à l'exception de Young, est persuadé de la validité de la théorie corpusculaire de la lumière de Newton. Nous avons vu au chapitre 3 que, dans cette théorie, on explique la réfraction par une augmentation de la vitesse des corpuscules de lumière lorsqu'ils pénètrent dans un corps plus dense.



Figure 10.2. Dispositif pour la mesure de l'indice de réfraction des gaz par Biot et Arago, supposé vu du dessus. Explications dans le texte.

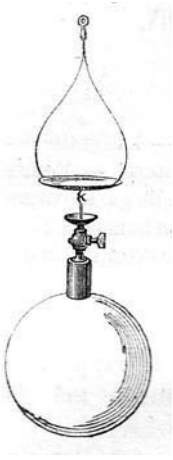


Figure 10.3. Le dispositif de Biot et Arago pour mesurer la densité d'un gaz, suspendu au plateau d'une balance. Explications dans le texte.

On suppose (en termes modernes) qu'une énergie cinétique qui ne dépend que de la nature du corps réfringent s'ajoute à celle des corpuscules lumineux lorsqu'ils y pénètrent. Ceci conduit les physiciens à définir la « *puissance réfractive* » d'un corps comme l'augmentation du carré de la vitesse des corpuscules lorsque la lumière venant du vide pénètre dans ce corps : cet accroissement est proportionnel à n^2-1 , si n est l'indice de réfraction défini comme le rapport du sinus de l'angle d'incidence i au sinus de l'angle de réfraction r : $n = \sin i / \sin r$. En effet, dans la théorie corpusculaire, l'indice de réfraction est aussi égal à $n = v/c$, v étant la vitesse de la lumière dans le corps réfringent, laquelle est plus grande que celle dans le vide c ; donc $n^2-1 = (v^2 - c^2)/c^2$ est bien l'augmentation relative du carré de la vitesse.

On pense également — c'est logique, bien qu'arbitraire, dans la théorie corpusculaire — que l'accroissement du carré de la vitesse est proportionnel à la masse spécifique ρ du corps réfringent^a. On est donc amené à considérer le « *pouvoir réfringent* » de ce corps, soit $(n^2-1)/\rho$. Nos deux savants ont la satisfaction de constater que le pouvoir réfringent d'un gaz reste constant quand on le comprime, mais ils découvrent à leur grande surprise que l'hydrogène a un pouvoir réfringent 6,5 fois plus grand que l'air. Ils observent que le pouvoir réfringent d'un mélange de gaz est la somme des pouvoirs réfringents de chacun pris séparément, pondérée par leur masse dans le mélange. Ils s'attendent à ce qu'il en soit de même pour un composé comme la vapeur d'eau. Or cela ne marche pas du tout : le pouvoir réfringent de la vapeur d'eau n'est pas égal à la somme pondérée de ceux de l'hydrogène et de l'oxygène pris dans les proportions convenables. Ils mesurent un pouvoir réfringent de la vapeur d'eau de 1,72, alors qu'ils calculent qu'il devrait être de 1,54. Ils sont tellement perturbés par ce résultat qu'ils mettent en doute leurs mesures et même les proportions, pourtant bien établies par les déterminations de Lavoisier, et plus récemment de Humboldt et Gay-Lussac, dans lesquelles l'hydrogène et l'oxygène sont combinés dans l'eau.

C'est la motivation de nouvelles mesures qu'Arago va faire en 1815 avec son beau-frère Alexis Petit⁴. Cette fois ils font des mesures sur beaucoup de nouveaux gaz (elles resteront inédites et c'est Barral qui les réduira pour Arago vers 1852), sur l'eau dont ils mesurent comment

^a Laplace affirme dans sa *Mécanique céleste* que c'est « l'hypothèse la plus naturelle qu'on puisse admettre ».

l'indice de réfraction dépend de la température, et surtout sur des liquides comme le sulfure de carbone et leurs vapeurs. Ils observent que pour un même composé chimique le pouvoir réfringent n'est pas le même pour le liquide et la vapeur. Dans l'hypothèse newtonienne de la lumière, il faut donc supposer contrairement aux idées reçues « *que l'attraction d'un même corps sur la lumière ne s'exerce pas proportionnellement à la densité* ».

Arago et Petit font aussi des mesures de la « *force dispersive* » (dispersion de la lumière) par le sulfure de carbone liquide et gazeux⁵. Elles leur posent des problèmes du même genre : le rapport du « *pouvoir dispersif* » au « *pouvoir réfringent* » diffère pour le liquide et pour la vapeur. Ils concluent : « *Ces diverses suppositions diminuent, sans doute, et la simplicité et la vraisemblance de la théorie newtonienne.* »

Les expériences d'Arago avec le prisme creux seront continuées par Dulong en 1825⁶. Il ne peut que confirmer les résultats précédent et conclut de façon définitive :

« Les puissances réfractives des gaz réputés simples ne paraissent avoir aucun rapport avec leurs densités. [...] Pour aucune combinaison gazeuse dont les éléments peuvent exister séparément à l'état de fluide élastique, le pouvoir réfringent n'est égal à la somme de ceux des éléments. »

Les mesures interférentielles

Au chapitre 3, nous avons vu qu'Arago et Fresnel, ayant interposé une lame de verre dans un des deux faisceaux lumineux d'une expérience d'interférence, constatent un déplacement des franges qui est dû à l'augmentation du trajet optique dans ce faisceau : ils réaliseront ainsi, mais pas immédiatement, que, contrairement à ce que prévoit la théorie newtonienne, la lumière va plus lentement dans le verre que dans l'air. Arago comprend vite que l'on peut utiliser ce fait pour comparer avec une précision fortement accrue la vitesse de la lumière dans l'air sec et dans l'air humide⁷. À cet effet, il fait construire un dispositif dans lequel il fait passer deux faisceaux lumineux issus d'une même source dans deux tubes de cuivre parallèles d'un mètre de long, fermés aux deux extrémités par des lames de verre à faces parallèles, puis observe les interférences entre ces deux faisceaux. Les mesures, qui s'étendent de 1816 à 1818, sont faites avec Fresnel. Ils introduisent de l'air saturé d'humidité dans les deux

tubes, puis dessèchent celui d'un des tubes avec de la potasse caustique. Ils constatent un déplacement des franges d'interférence au fur et à mesure que l'air se dessèche, déplacement qui n'atteint qu'une frange et quart. Arago et Fresnel montrent ainsi que l'air sec a un indice de réfraction très légèrement supérieur à celui de l'air humide : mais la différence est si faible que les astronomes peuvent la négliger dans leurs calculs de réfraction atmosphérique, comme l'avait annoncé Biot en 1807 à partir des mesures bien moins précises qu'il avait faites avec Arago.

On ne peut qu'admirer l'habileté qu'ont montrée Arago et Fresnel dans ces mesures difficiles, et aussi la rigueur avec laquelle ils ont mené leurs expériences. Les contemporains ne s'y sont pas trompés, et Arago note avec fierté l'opinion de Laplace, qui parle de ses mesures à la presse et écrit en 1824, dans la cinquième édition de son *Système du monde* : « M. Arago, par un moyen aussi précis qu'ingénieux, s'est assuré que l'influence de l'humidité de l'air sur sa réfraction est insensible. »

Beaucoup plus tard, en 1850, Arago va tenter de reprendre des mesures interférentielles sur la variation de l'indice de réfraction de l'eau liquide avec la température et la pression, et décrit les modifications nécessaires de son appareil⁸ : mais ces mesures ne seront jamais réalisées. Par ailleurs, il fait construire par Soleil et Duboscq un nouvel appareil interférentiel destiné, cette fois, à voir si la présence de brouillard affecte l'indice de réfraction de l'air (figure 10.4 et figure 10.5). Il faut cette fois opérer en plein air, et non dans des tubes où le brouillard se serait rapidement déposé. C'est Laugier qui est chargé de faire l'expérience, laquelle montre que l'indice est légèrement augmenté par le brouillard, mais pas de façon suffisante pour gêner les mesures astronomiques ou géodésiques⁹.

Enfin, Arago, certainement impressionné par l'habileté de Fizeau qui avait montré expérimentalement l'entraînement de la lumière par un courant d'eau (voir le chapitre 4), le charge de faire encore des mesures sur l'indice de réfraction de l'air sec et saturé d'humidité à différentes températures. Fizeau utilise pour cela en 1852 un appareil simple semblable à celui d'Arago et Petit en 1815, mais compense le déplacement des franges à l'aide d'une lame de verre d'inclinaison variable, comme dans l'appareil de la figure 10.4. Les résultats de toutes les expériences d'Arago et de Fizeau sur la réfraction des gaz seront consignés par Barral dans un grand mémoire¹⁰.

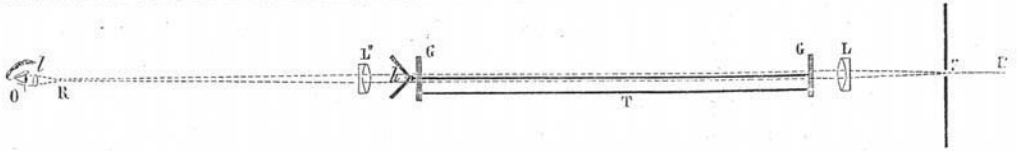


Figure 10.4. Schéma de l'appareil interférentiel d'Arago pour la mesure des réfractions. La source de lumière à droite illumine une fente F ; la lumière transmise forme un faisceau parallèle après traversée de la lentille L. Ce faisceau est séparé en deux faisceaux que la lentille L' fera se réunir en R, où l'on observe les franges d'interférence avec l'oculaire l (il n'y a pas besoin de fentes d'Young dans ce dispositif car on est en lumière parallèle, à condition que les fenêtres G soient d'excellente qualité optique). Le faisceau du dessus passe dans l'air libre chargé de brouillard, l'autre dans un tube carré T où l'air est desséché. Les lames obliques k peuvent être inclinées pour compenser le déplacement des franges, et la mesure se fait en repérant l'angle dont on les a fait tourner.

Les phares

Les phares jusqu'au XIX^e siècle

Les phares existent depuis l'Antiquité. En France, le premier a été érigé par les Romains en 40 après J.-C. à Boulogne-sur-mer¹¹. Il y en aura six sur les côtes de France à la fin du XVII^e siècle, et quinze en 1775. On y fait un feu de bois sur la plate-forme, mais il est exceptionnel qu'on allume ces feux toute la nuit, car le combustible coûte cher (700 kg de bois sont nécessaires chaque nuit pour alimenter le phare de Chassiron, sur l'île d'Oléron). Le plus souvent, on ne les allume qu'à l'approche d'un navire. Les pêcheurs font souvent faire un feu de bois à l'extrémité

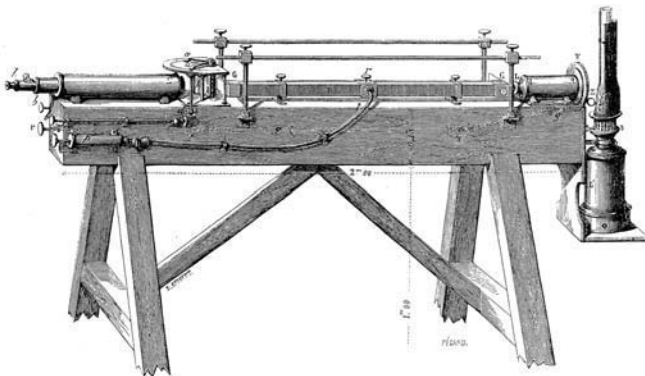


Figure 10.5. L'appareil interférentiel d'Arago pour la mesure des réfractions.

de la jetée de leur port afin de pouvoir y rentrer la nuit. Les choses s'améliorent quand une entreprise privée spécialisée dans l'éclairage des villes, la Compagnie Tourville-Sangrain, obtient vers 1770 la concession des phares. Cette année-là, elle installe la première lampe à huile munie d'un réverbère sur le phare de Sète. Suivent le phare de la pointe Saint-Mathieu, à la sortie du goulet de Brest, puis celui du Planier près de Marseille ; ce dernier atteint alors une portée de 28 km par beau temps. L'utilisation de l'huile étant plus économique que celle du bois, les phares peuvent souvent fonctionner en permanence et sont alors entretenus par une équipe de deux gardiens.

Les réverbères sont des miroirs idéalement paraboliques, mais souvent sphériques, en cuivre argenté. Comme les lampes à huile sont peu puissantes, on est amené à les multiplier et à les munir chacune d'un petit réflecteur : par exemple, le phare de Cordouan est muni en 1782 de 84 becs à huile avec autant de réflecteurs de courbure sphérique ; mais le résultat est décevant. Le problème est étudié par l'ingénieur en chef des bâtiments civils de la marine à Bordeaux, Joseph Teulère, qui décide enfin d'importantes améliorations proposées par Borda, qui est alors inspecteur des constructions navales. Ces améliorations seront adoptées par l'ensemble des nations maritimes, dont les États-Unis et l'Angleterre, et survivront dans certains cas jusqu'au xx^e siècle. Les lampes sont maintenant munies d'une mèche circulaire creuse inventée par le suisse Aimé Argand, ce qui en augmente beaucoup la puissance. On sait aussi faire tourner le système optique par un mécanisme d'horlogerie pour faire un phare à éclats, ce qui est réalisé pour la première fois à Dieppe en 1787. Arago résume ainsi ces progrès¹² :

« Les phares ne sont sortis de l'état d'imperfection [...] qu'après 1784, après l'invention, faite par Argand, de la lampe à double courant d'air. A cette époque, Borda, qui a laissé dans la marine française une trace si glorieuse, imagina, non seulement de substituer les lampes d'Argand aux chandelles, mais encore de les placer au foyer de réflecteurs paraboliques. [...] Les premiers réflecteurs étaient sphériques et portaient à leur foyer des mèches plates [les chandelles], fort ternes, semblables à celles qu'on adapte aux réverbères de nos rues qui n'ont pas encore le privilège d'être éclairées par la belle flamme que produit la combustion du gaz.

Borda [donna], à l'aide d'un mouvement d'horlogerie, un mouvement de rotation à l'ensemble des réflecteurs. Le cylindre de lumière se trouve ainsi successivement dirigé vers tous les points de l'horizon : et en adoptant des mouvements de rotation d'inégale durée, on a le moyen d'individualiser chaque phare. »

Le premier appareil de ce type, construit par Étienne Le Noir sur les indications de Borda, est essayé à Versailles en 1790 et installé en 1791 sur le phare de Cordouan : comprenant 12 grands réflecteurs paraboliques de 81 cm de diamètre groupés autour d'une axe tournant, c'est sans conteste le plus efficace et le plus puissant du monde.

En 1792, la nouvelle Assemblée nationale décide de nationaliser les phares et les balises, qui restent cependant affermés à la Compagnie Tourville-Sangrain. Les difficultés sont nombreuses, surtout avec le ministère de la Marine qui finit par se désengager, les phares et balises passant en 1806 sous la tutelle du ministre de l'Intérieur. La Marine ne conserve que le balisage des ports militaires. Il est aussi créé en 1811 une Commission permanente des phares « pour donner son avis sur toutes les questions que peut soulever l'exécution des phares », où siègent des représentants de l'Institut, de la Marine et des Ponts et Chaussées.

Arago et Fresnel interviennent

La Commission des phares comprend à sa création Malus, mais celui-ci meurt l'année suivante et est remplacé en 1813 par Arago. Il n'y a guère d'argent pour entretenir les phares et les balises, et aucun nouveau phare ne sera construit pendant l'Empire. La Commission fait cependant différents essais, par exemple en 1814 celui d'un grand réflecteur de près d'un mètre de diamètre entre Montmartre et Montlhéry, « en présence de plusieurs membres de l'Institut et d'un grand nombre d'ingénieurs distingués ».

Mais les plaintes des marins sur le mauvais fonctionnement et le peu d'efficacité des phares, qui se dégradent continuellement, s'amoncellent sur le bureau du directeur des Travaux publics, qui est responsable des phares. À son arrivée à ce poste en 1817, le nouveau directeur, M. Becquey, s'inquiète de la situation et relance les travaux de la Commission. Arago reprend du service actif :

« J'avais été chargé par mes collègues de présider aux expériences de la commission ; mais des occupations nombreuses

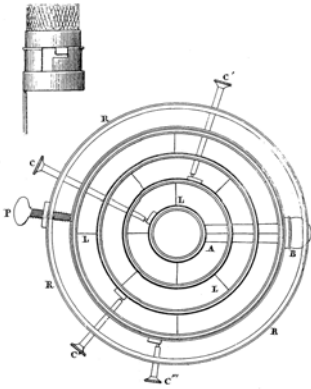


Figure 10.6. Le bec à huile à quatre mèches concentriques d'Arago et Fresnel. En haut à gauche, l'aspect extérieur vu de profil, avec la toile métallique. Le diamètre est de 90 mm.

ne me permettant pas de me livrer à ce travail avec toute la suite désirable, je demandai au commencement de 1819 qu'on voulût bien m'adjoindre un collaborateur^b. Je dois regarder, comme un des bonheurs de ma vie, d'avoir, dans cette circonstance, soupçonné qu'un ingénieur, alors presque inconnu, serait un des hommes dont les découvertes illustreraient le plus notre patrie ; d'avoir obtenu que Fresnel devînt le secrétaire de la commission des phares.

Ce savant célèbre imagina d'abord d'appliquer de grandes lentilles à l'éclairage de nos côtes ; de les construire par petits fragments, de se rendre ainsi indépendant des imperfections de l'art du verrier qui ne sait pas encore produire de grandes masses de verre d'une certaine épaisseur, bien diaphanes et sans stries intérieures. Tout cela fut aussitôt exécuté que conçu : des expériences nombreuses et délicates amenèrent aussi à la construction d'une lampe à plusieurs mèches concentriques, dont l'éclat égalait plus de vingt fois celui des meilleures lampes ordinaires à double courant d'air. C'est en combinant les lentilles de Fresnel avec la lampe multiple, qu'on a obtenu d'aussi étonnants résultats. »

Disons d'abord quelques mots des lampes à huile, dont Arago et Fresnel s'attachent à augmenter la puissance. Reprenant une idée non réalisée de l'anglo-américain Benjamin Rumford, ils font fabriquer des becs munis de deux, trois puis quatre mèches concentriques (figure 10.6 et figure 10.7), alimentées en huile sous pression par un système inventé par Carcel pour ses fameuses lampes et réalisé par Wagner. Le capitaine Kater, qui a déjà collaboré avec Arago et avec lequel ce dernier fera le raccordement géodésique de Paris et de Greenwich, assiste au premier essai réussi en octobre 1819. Les becs, dont les plus gros consomment environ 750 grammes d'huile à l'heure, fonctionnent très bien, et seront progressivement placés sur tous les phares¹³.

Les lentilles de Fresnel

Pour Fresnel, les lentilles convergentes sont mieux adaptées que les miroirs pour l'éclairage des phares : en effet, les miroirs argentés sont difficiles à fabriquer, se ternissent

^b Arago ne se souvient que de Fresnel ; il avait cependant demandé que Mathieu lui soit aussi adjoint pour faire une nouvelle série d'expériences.

vite et sont encombrants. Mais les lentilles doivent être de courte distance focale pour que l'optique n'ait pas de dimensions excessives, tout en ayant un grand diamètre. Une lentille simple répondant à ces caractéristiques serait très épaisse, donc très lourde et absorbant beaucoup la lumière, et produirait aussi beaucoup d'aberration chromatique. D'où l'idée de la lentille à échelons, formée de zones concentriques peu épaisses qui ont toutes le même foyer, où l'on place la mèche (figure 10.8). Cette idée est due à Buffon¹⁴, qui voulait ainsi concentrer les rayons du Soleil. Elle n'a pas été suivie de réalisation, car Buffon imaginait de tailler la lentille dans un seul bloc de verre, ce qui était impossible à l'époque. Condorcet, dans son *Éloge de Buffon* de 1788, a proposé de « faire ces lentilles de pièces de verre séparées ». Mais d'après Arago, « [les lentilles à échelons] étaient à peu près restées, jusqu'en 1820, dans le domaine des simples spéculations ». Pour Fresnel, qui ignore probablement la proposition de Condorcet, « cette application des lentilles à l'éclairage des phares ne pouvait être une idée nouvelle, car elle venait trop aisément à la pensée ». Mais il faut la réaliser :

« Ce qui m'a le plus occupé, ce sont les moyens d'exécution, pour lesquels j'ai été parfaitement secondé par le zèle et l'intelligence de M. Soleil, opticien qui a courageusement entrepris la construction de ces grandes lentilles. »

La première lentille ainsi construite (figure 10.9) est essayée le 12 mai 1820 devant la Commission des phares, qui la trouve de beaucoup supérieure aux meilleurs réflecteurs de l'époque. Elle est faite de nombreux prismes à courbure sphérique, collés les uns aux autres. Peu après, Soleil réussit à fabriquer des prismes annulaires formant une fraction de la circonférence d'un cercle. Un système utilisant cette innovation, formé de huit lentilles éclairées par une lampe centrale, est essayé en août 1822 sur l'Arc de triomphe de l'Étoile, alors en construction. Quatre membres de la Commission des phares se rendent à Notre-Dame de Montmélian, à 16 400 toises (32 km) et observent que les éclats « ont paru très brillants ». Le 20 juillet 1823, l'appareil est installé sur le phare de Cordouan en remplacement de celui de Borda et Le Noir (figure 10.10 et figure 10.11). Les commentaires des marins et aussi des Anglais « que les bains de mer amènent à Royan » sont enthousiastes. Le prix de cet appareil est estimé à environ 28 000 francs, dont 13 800 pour l'optique.

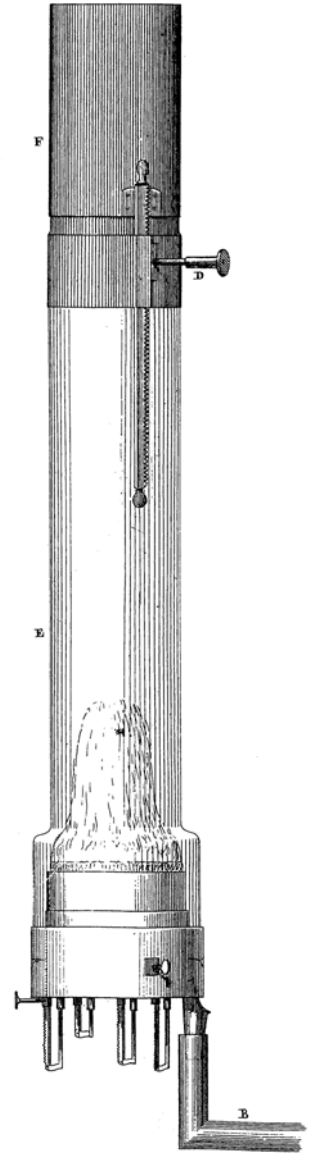


Figure 10.7. Vue latérale de la lampe à huile d'Arago et Fresnel. Elle est alimentée en huile sous pression par le tuyau du bas, à la manière des lampes de Carcel.

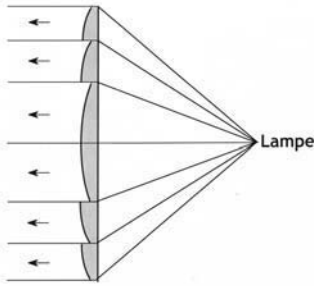


Figure 10.8. Principe de la lentille à échelons.

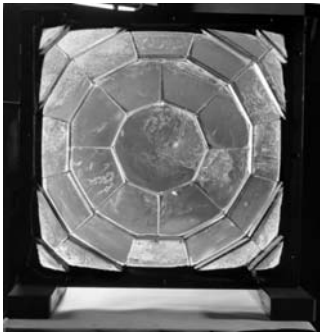


Figure 10.9. La première lentille à échelons de Fresnel, conservée à l'Observatoire de Paris (1820).

Suite à ce succès, la Commission, dont Fresnel devient en mai 1824 le véritable chef en tant que secrétaire, va s'efforcer d'équiper le plus possible de phares avec cette nouvelle optique, qui prendra des formes variées selon les besoins. Fresnel et son collègue Paul Édouard de Rossel établissent aussi en 1825 un programme général d'éclairage des côtes de France très ambitieux et très bien conçu, comprenant 28 phares du premier ordre (portée 60 km), 5 phares du second ordre (40 km) et 18 du troisième ordre (28 km)¹⁵. Ce projet, augmenté encore d'une dizaine de phares, sera presque entièrement réalisé en 1850 où 58 phares seront en service. Le coût de fonctionnement de ces phares est élevé : environ 500 000 francs par an au total. Le nombre de phares fera plus que doubler encore par la suite.

Soleil ne peut à lui seul fournir toutes les lentilles nécessaires à ce programme. Aussi d'autres fabricants interviennent : Henri Lepaute et la maison François jeune. Et il faut réaliser non seulement les lentilles elles-mêmes, mais aussi, pour ne pas perdre de lumière, l'optique qui renvoie à l'horizontale les rayons lumineux issus de la lampe qui passent au-dessus et au-dessous des lentilles. L'optique mixte de Cordouan, qui utilise des lentilles et des miroirs, est très compliquée et les miroirs s'altèrent. Elle est progressivement remplacée d'abord par des miroirs paraboliques excentrés très difficiles à réaliser (figure 10.12), puis par des anneaux réfléchissants dont la fabrication est considérée comme « *grave et périlleuse* ». La solution définitive utilise des anneaux de verre à section triangulaire qui produisent une réflexion totale (figure 10.13). La fabrication très difficile de ces grands anneaux, dont le diamètre atteint 2 mètres pour les phares de premier ordre comme celui de la Hève (figure 10.14), n'a été réussie pour la première fois qu'en 1843 par François jeune pour le phare de Skerryvore en Écosse. Le gain en lumière est important, mais le prix aussi.

Bien entendu, l'innovation de Fresnel suscite un très grand intérêt à l'étranger. C'est ainsi qu'ayant vu des lentilles à échelons polygonaux qui servent de réverbères lors du rattachement géodésique de la France à l'Angleterre en 1821¹⁶, Colby, un des responsables de l'opération, demande à Fresnel un devis pour un « *appareil lentillaire à feux tournants* » pour les phares¹⁷. Vers 1850, il y a 126 phares sur les côtes d'Angleterre, d'Écosse et d'Irlande, et pas moins de 138 sur les côtes des États-Unis. La plupart sont équipés de lentilles de Fresnel.

Les résultats de cette innovation ont été immédiatement spectaculaires. Arago note qu'il y eu en moyenne 163 naufrages par an sur les côtes françaises de 1816 à 1823, et seulement 39 par an de 1824 à 1831. Pourtant seule une dizaine de phares sont équipés de lentilles de Fresnel à cette dernière date. L'invention de Fresnel a donc sauvé une quantité impressionnante d'hommes



Figure 10.10. Le phare de Cordouan, à l'embouchure de la Gironde. Sa base remonte au XVII^e siècle. Il a souvent été le banc d'essai des optiques de phares françaises.

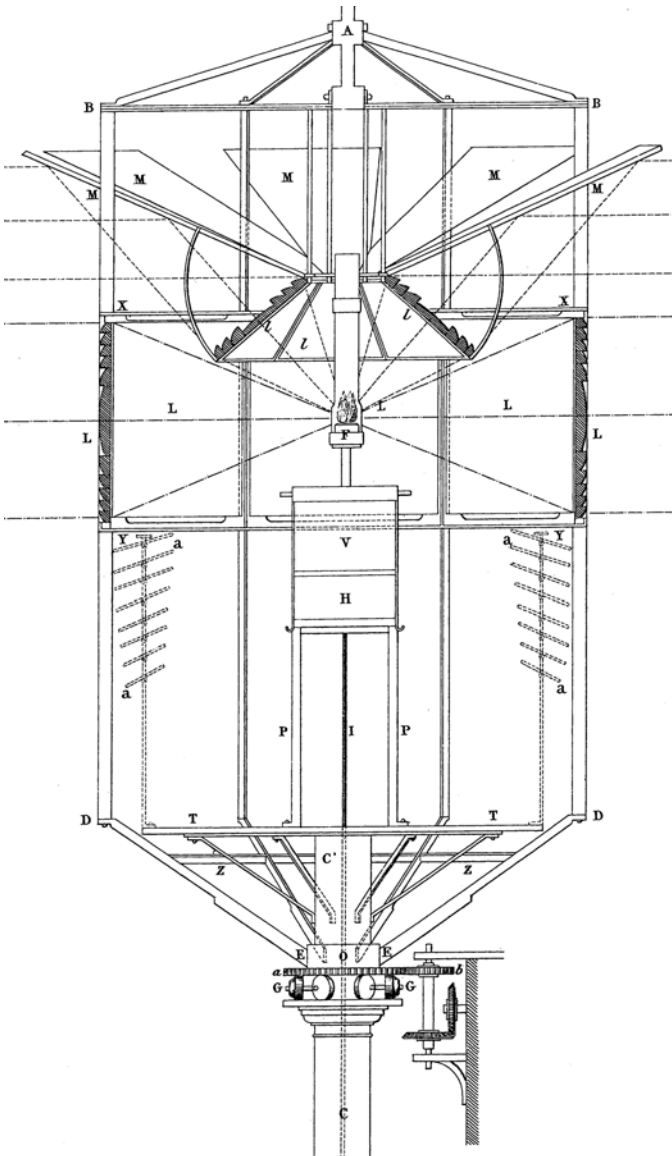


Figure 10.11. L'optique de Fresnel, construite par Soleil, installée sur le phare de Cordouan en 1823. Huit lentilles à échelons circulaires sont installées au niveau de la lampe centrale sur un tambour tournant. Elles sont surmontées de huit panneaux comportant chacun une lentille à échelons et un miroir plan : les faisceaux de lumière parallèle ainsi formés sont renvoyés à l'horizontale. Cette optique spectaculaire est conservée au Musée des phares, à Ouessant.

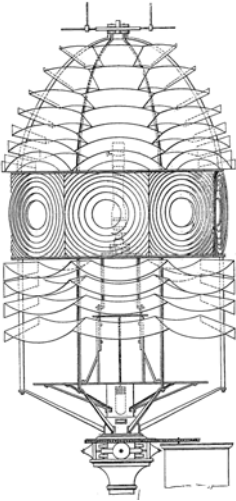
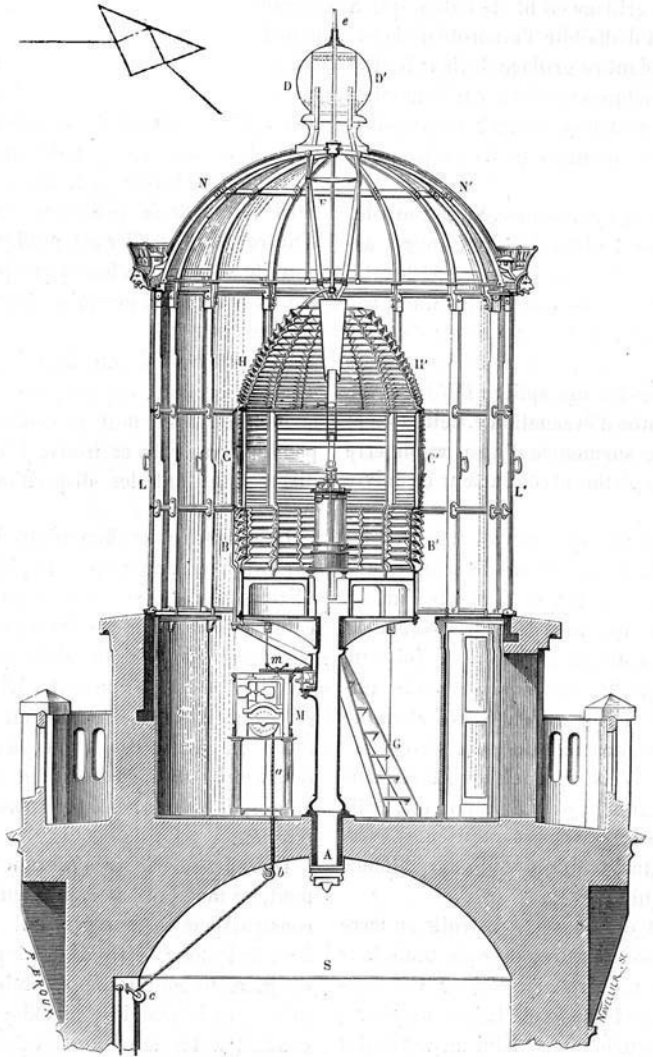


Figure 10.12. Projet d'optique de phare par Fresnel. Ici, la lumière émise par la lampe vers le haut et vers le bas est renvoyée horizontalement par des miroirs paraboliques excentrés.

Figure 10.13. Optique de Fresnel pour un phare de premier ordre. Il s'agit d'un feu fixe omnidirectionnel, et la lentille de Fresnel est cylindrique. Au-dessus de la lampe, des anneaux à réflexion totale, à section triangulaire, renvoient horizontalement la lumière de la lampe selon le principe indiqué par le petit schéma en haut à gauche.



et de biens. Comme le dit Arago dans un article de 1828 où il proteste à nouveau contre les vantardises de Brewster^c, qui prétend cette fois avoir eu le premier l'idée de construire les lentilles à échelons de plusieurs pièces de verre¹⁸ :

^c Brewster avait une peur malade de périr noyé dans un naufrage, d'où son intérêt pour les phares !

« En écrivant ce long article, [...] j'ai tenu surtout à prouver que l'ami dont une mort cruelle m'a si promptement séparé, n'avait pas seulement attaché son nom aux plus subtiles, aux plus ingénieuses découvertes de l'optique, mais qu'il avait encore acquis, par l'invention des phares lenticulaires, des droits incontestables à la reconnaissance des marins de toutes les nations. »

La vitesse du son

Marin Mersenne et Pierre Gassendi semblent avoir été les premiers à mesurer la vitesse du son dans l'air, au cours de la première moitié du XVII^e siècle. D'autres mesures ont été faites un peu plus tard en France par l'Académie des sciences, en Angleterre et en Italie, avec des résultats contradictoires. En conséquence, l'Académie « *qui ne se pique point d'infailibilité, se résolut volontiers à recommencer de nouveau tout ce travail* ». On fit donc en 1738 de nouvelles mesures entre divers lieux de la région parisienne dont les positions étaient bien connues par triangulation. Un canon était placé sur un des sites, et on notait à l'autre la différence entre le moment où on voyait la lueur et celui où on entendait le bruit de l'explosion. Plusieurs de ces mesures étaient réciproques, c'est-à-dire qu'on faisait à peu d'intervalle une mesure avec un canon sur l'un des sites et une autre avec un deuxième canon sur l'autre site. Ceci permettait de s'affranchir de l'influence du vent. Le résultat donné par Cassini de Thury, qui a fait les mesures avec Maraldi, La Caille et « *diverses personnes exercées aux observations* » est 173 toises par seconde avec une température de « *4° à 6° [Réaumur] au dessus de la congélation* »¹⁹. Ramenée à 0°C, cette vitesse est en unités modernes d'environ 333 mètres par seconde, ce qui est proche de la vitesse mesurée aujourd'hui, 331,5 m/s.

Quelles sont les raisons qui ont poussé le Bureau des longitudes à décider de recommencer ces mesures en 1822 ? Officiellement, c'est la qualité prétendument médiocre des mesures de 1738, ainsi que le manque tout aussi prétendu des « *circonstances atmosphériques* ». En 1818, Arago avait d'ailleurs mentionné des mesures faites au Chili en disant²⁰ :

« *Les observations dont il sera question dans cet article nous ont paru mériter d'être rapportées à cause de leur*

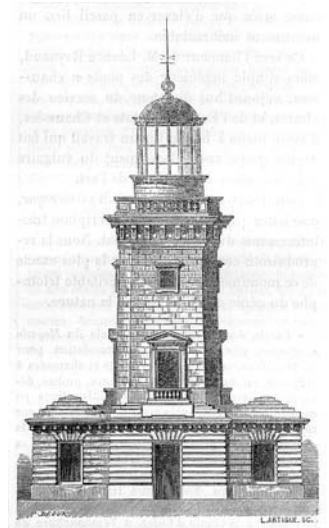


Figure 10.14. Un phare du premier ordre, portant à 60 km : un des deux phares de la Hève, à l'embouchure de la Seine.

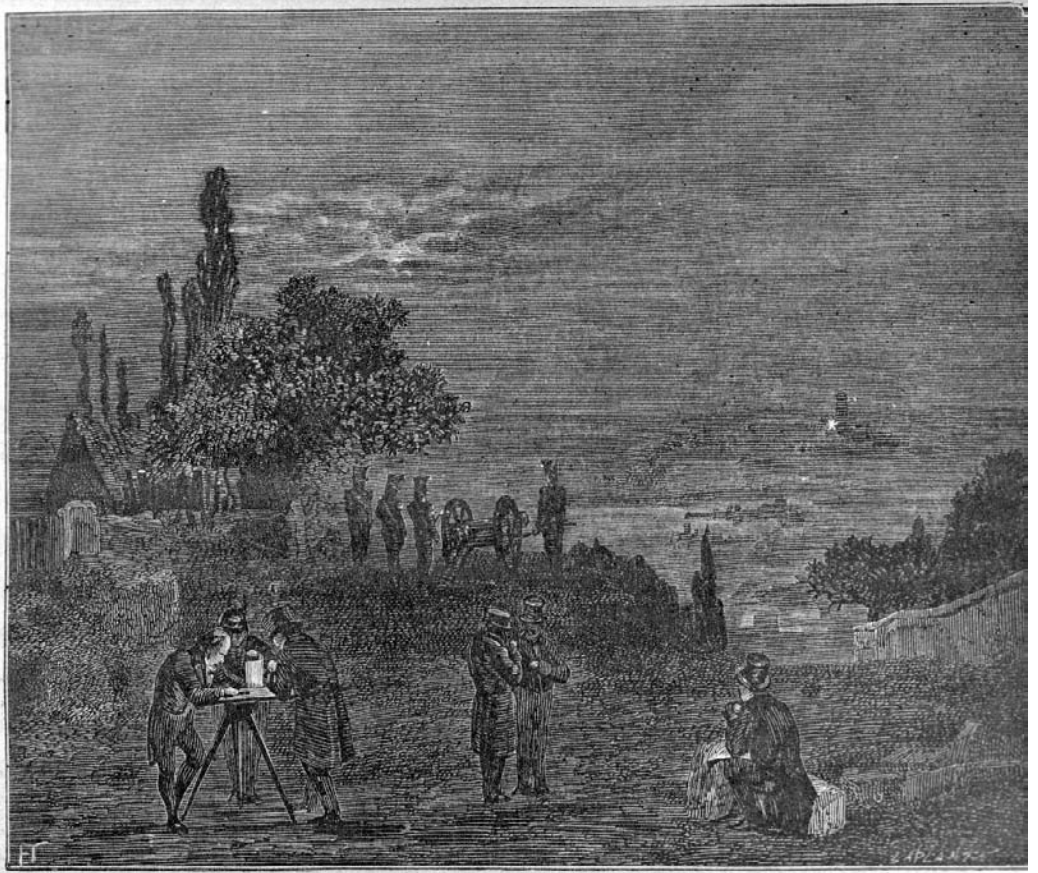


Figure 10.15. La mesure de la vitesse du son à Villejuif. La tour de Montlhéry, d'où l'on tire un coup de canon, est visible au fond à droite.

exactitude, et surtout parce qu'elles ont été faites à des températures élevées. [...] Nous nous étions proposé de comparer ces observations à celles qui ont été faites dans d'autres pays, afin d'apprécier les circonstances qui peuvent faire varier le développement de chaleur à l'aide duquel un géomètre illustre a cherché à concilier les résultats de la théorie et ceux de l'expérience ; mais malheureusement les observateurs ont presque toujours négligé de noter les circonstances atmosphériques. »

Ce texte nous donne la vraie raison : il s'agit de vérifier la nouvelle formule donnée en 1816 par l'« illustre géomètre » qui n'est autre que Laplace, pour

calculer la vitesse du son^d. Toujours est-il que le Bureau charge Humboldt, Gay-Lussac et Bouvard de se rendre à Montlhéry, et Arago, Mathieu et de Prony d'aller à Ville-Juif (sic) pour faire ces nouvelles mesures (figure 10.15). C'est donc l'élite des physiciens de l'époque qu'on charge de l'opération. Un canon est disposé à chaque endroit ; à Montlhéry, c'est le fils de Laplace, lieutenant-colonel d'artillerie, qui s'en occupe. Les mesures se font les nuits du 21 et du 22 juin 1822. On se munit de chronomètres de Breguet, et pour une des mesures d'un « *chronographe encreur* » d'un autre horloger, Nicolas-Mathieu Rieussec. Les mesures sont difficiles, car on entend mal à Montlhéry le canon de Villejuif. La distance de Villejuif à Montlhéry est par ailleurs remesurée par triangulation : un des triangles a pour sommets Villejuif, Montlhéry et le moulin de Fontenay, deux des stations de la triangulation de Delambre ; par mesure de précaution on complète la triangulation par des mesures au Panthéon, à l'Observatoire, à la pyramide de Montmartre et aux Invalides, avec un « *excellent théodolite de Gambey* », et enfin à l'Observatoire, avec le cercle azimutal de Reichenbach.

Ces mesures font l'objet de compte rendus dans diverses publications²¹. Elles sont un peu meilleures que celles de 1738, grâce à l'utilisation de chronomètres qui permettent une estimation plus précise du temps de trajet du son. Le résultat final est 173,01 toise par seconde à la température de 10°C, ce qui correspond à 331,2 m/s à 0°C (valeur actuelle : 331,5 m/s). On ne peut pas dire que la formule de Laplace soit mieux vérifiée par ces nouvelles mesures que par les anciennes, car les paramètres qui interviennent dans cette formule sont mal connus à l'époque. D'ailleurs Laplace tente de corriger le résultat précédent en tenant compte de la vapeur d'eau, pour arriver à un résultat trop grand²² !

^d La formule de Laplace qui donne la vitesse du son est $v = (C_p/C_v)^{1/2}(p/\rho)^{1/2}$, où C_p et C_v sont respectivement les chaleurs spécifiques de l'air à pression et à volume constant ($C_p/C_v = 1,402$), p la pression et ρ la masse volumique de l'air, qui varie comme l'inverse de la température absolue T . La vitesse du son est donc proportionnelle à la racine carrée de T .



Figure 10.16. Pierre Louis Dulong (1785-1838).

La « force élastique » de la vapeur d'eau

Les machines à vapeur ont été dès le début — et surtout au début — source de nombreux et graves accidents, et on ne s'étonnera pas que cela préoccupe l'Académie des sciences. Au début de 1823, elle crée une commission pour examiner les mesures à prendre pour améliorer la sécurité des machines. Cette commission va rendre plusieurs rapports, dont l'un contient une « *Table des Forces élastiques de la vapeur d'eau à diverses températures, jusqu'à 8 atmosphères* », c'est-à-dire de la pression de vapeur saturante telle qu'on la trouve dans la chaudière d'une machine à vapeur²³. Elle ajoute :

« *Il serait impossible d'aller au delà sans faire de nouvelles observations. Nous avons demandé à M. le Directeur de l'Agriculture et du Commerce l'autorisation nécessaire pour faire construire les appareils propres à ce genre de détermination. Sa réponse ne nous est point encore parvenue.* »

Cette autorisation va bientôt parvenir, et l'Académie charge une nouvelle commission composée d'Arago, Ampère, Dulong, Girard et de Prony de faire ces mesures. Seuls Arago et Dulong vont effectivement y travailler, de 1825 à 1829 ; Dulong (figure 10.16) est un habitué des expériences dangereuses, qui lui ont déjà fait perdre un œil, et Arago est intrépide. La *Bibliothèque universelle de Genève* en dit²⁴ :

« *MM. Arago et Dulong se sont chargés de suivre [les] recherches pénibles et souvent dangereuses que rendoit nécessaires la solution de la question qui les occupoit. Les personnes habituées aux grandes expériences de physique peuvent seules apprécier l'énormité de la tâche qui leur étoit imposée et qu'ils ont su trouver le moyen de remplir, malgré leurs nombreuses occupations, avec ce zèle et ce dévouement éclairé pour la science dont ils ont déjà donné tant de preuves.* »

En effet, ces expériences sont à la fois difficiles et dangereuses. On veut faire des mesures jusqu'à des pressions très élevées, et il faut d'abord mesurer la pression. Dulong a donc fait réaliser dans ce but l'appareil représenté figure 10.17. Comme une grande hauteur est nécessaire, il est placé dans la tour du Collège royal Henri-IV, seul reste de l'église Sainte-Geneviève sur la « *montagne* » du même nom. Nos deux hommes étalonnent ainsi leur

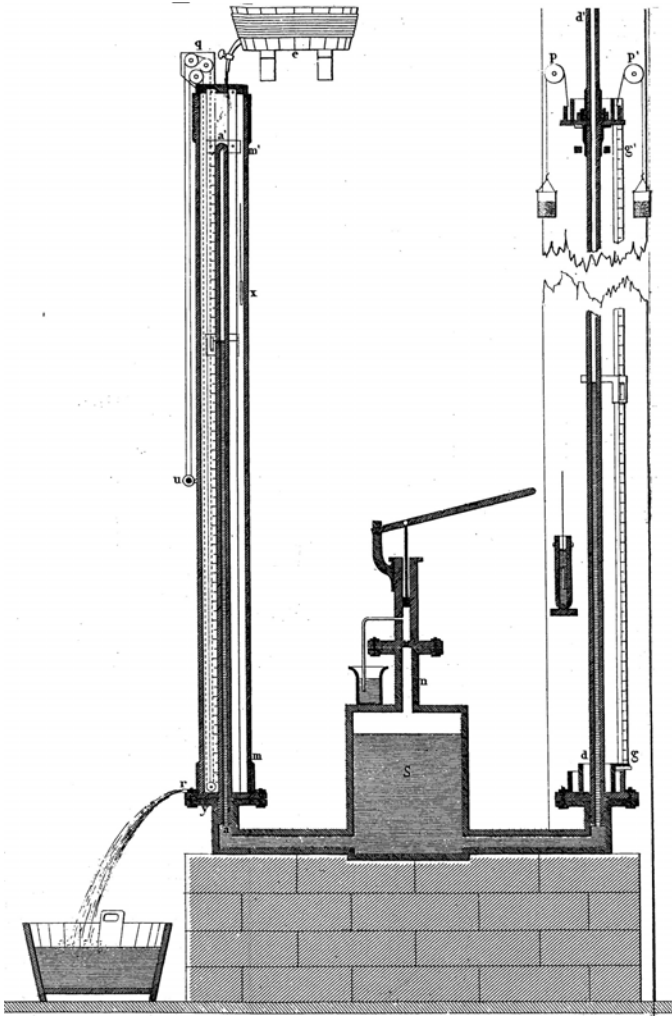


Figure 10.17. L'appareil utilisé par Arago et Dulong pour vérifier la loi de Mariotte et étalonner leur manomètre. Il est rempli de mercure. Grâce à la pompe centrale, on fait monter le mercure simultanément dans le tube de droite, qui est ouvert en haut, et dans le tube de gauche, qui est fermé en haut et emprisonne de l'air. Le tube de droite est formé de 13 éléments en cristal épais, de 2 mètres de long, raccordés l'un à l'autre et soutenus à diverses hauteurs comme on peut le voir en haut ; sa hauteur totale est de 26 mètres environ. À la pression maximale des essais, 27 fois la pression atmosphérique, le mercure, dont la hauteur est repérée par une échelle graduée, y monte à 20,5 mètres. Pour chacune des pressions mesurées ainsi, on repère la hauteur du mercure dans le tube de gauche, qui servira de manomètre pour la mesure de la pression de vapeur d'eau saturante. La circulation d'eau assure une température connue dans ce manomètre.

manomètre à mercure jusqu'à une pression de 27 atmosphères, vérifiant ce faisant pour la première fois la validité jusqu'à cette pression de la loi de Mariotte, qui dit que le produit de la pression par le volume d'un gaz est une constante si la température est fixée.

Cependant un grave problème se pose pour la suite des opérations. Le rapport final dit²⁵ :

« Après avoir remarqué que la moindre explosion pouvait entraîner l'éboulement des trois voûtes [de la tour] dont l'état de délabrement faisait craindre même une chute spontanée, effrayés des conséquences d'un pareil accident,

qui aurait pu compromettre les bâtiments environnans, nous nous déterminâmes à faire les expériences sur la vapeur d'eau dans une des cours de l'Observatoire. Il fallut donc y transporter le manomètre sans le séparer du réservoir en fonte auquel il était adapté, afin que les nouvelles indications de l'instrument fussent identiques avec les premières. Cette translation n'était pas sans difficulté, à cause du poids énorme de l'ensemble et des grandes dimensions du tube à air. Cependant, par des précautions multipliées, nous

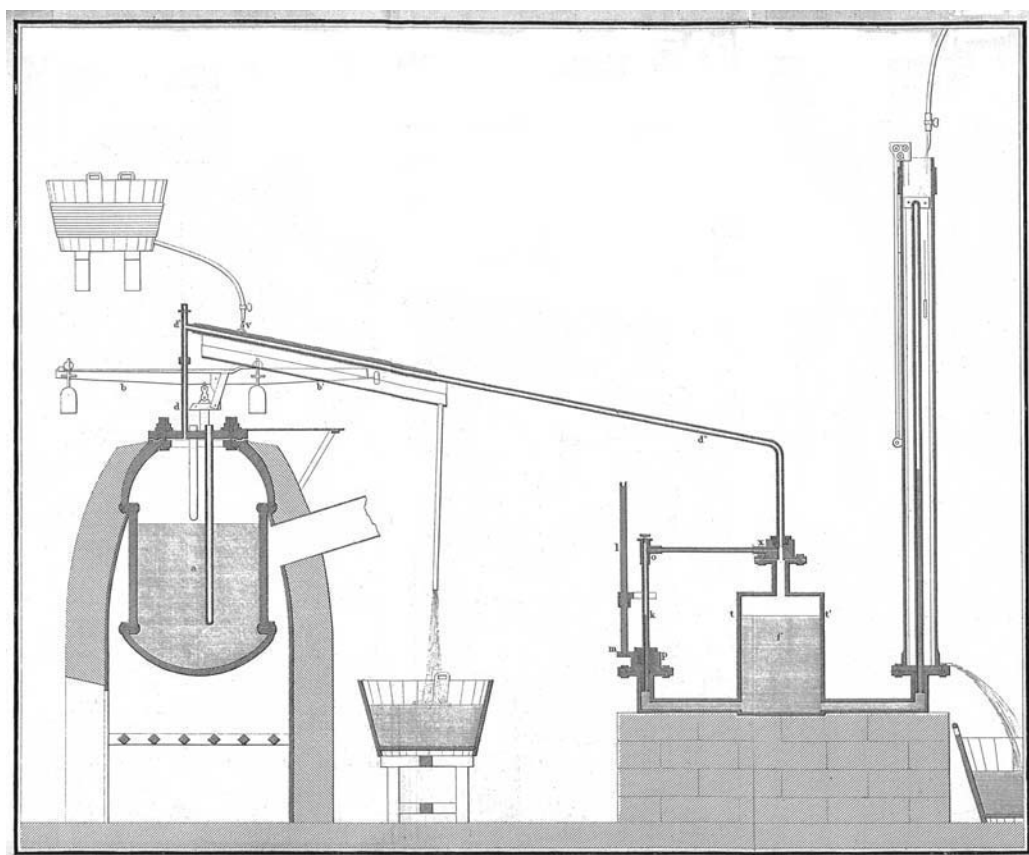


Figure 10.18. L'appareil utilisé par Arago et Dulong pour mesurer la pression de vapeur d'eau saturante. La chaudière, à gauche, communique avec le réservoir de mercure, à droite, et la pression est mesurée avec le manomètre provenant de l'appareil de la figure 10.17. Les deux tubes qui plongent dans la chaudière sont destinés à contenir des thermomètres. On voit au-dessus de la chaudière le long levier de la soupape de sûreté. Une circulation d'eau condense la vapeur dans le tube oblique qui réunit les deux parties de l'appareil, de manière à ce que ce tube soit constamment plein d'eau jusqu'à son raccord avec le tube vertical qui sort de la chaudière.

avons réussi à l'opérer, en conservant la même masse d'air qui existait primitivement dans le tube. »

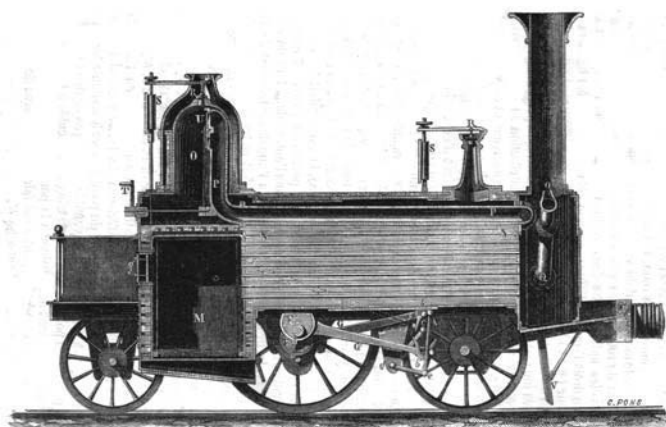
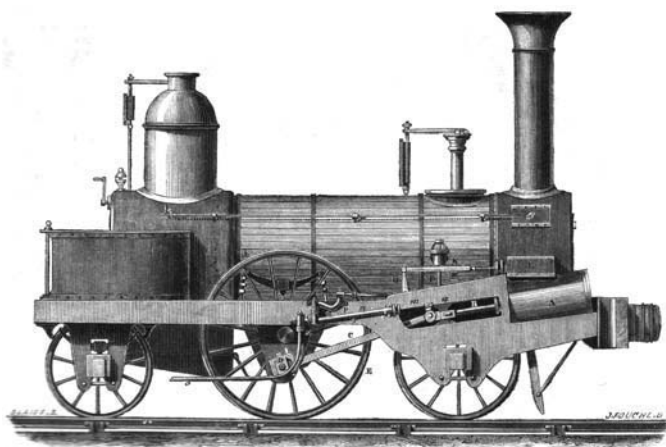
On installe donc dans la cour de l'Observatoire l'appareil présenté dans la figure de la page de titre de ce chapitre, dont le principe est représenté dans la figure 10.18. On y adapte le manomètre étalonné précédemment. La chaudière doit résister à une pression considérable, si bien qu'on l'essaie d'abord avec une pompe à eau *« telle que celles qui sont employées pour le service des presses hydrauliques. Pour appliquer à notre chaudière l'article du règlement concernant les essais préalables, il aurait fallu la soumettre à une pression de 150 atmosphères ; mais, bien avant ce terme, quelques fissures du métal et plusieurs des joints rivés laissaient sortir une quantité d'eau égale à celle que la pompe permettait d'injecter dans le même temps, si bien que la pression ne pouvait plus être augmentée »*. On se résigne donc à arrêter les essais à ce moment-là, mais on met une soupape de sécurité sur la chaudière.

Lors de l'expérience, la chaudière fuit tellement qu'on ne peut dépasser une pression de 24 atmosphères, et on s'arrête là. On imagine le courage qui est nécessaire à nos deux savants pour faire ces mesures terrifiantes, dont certaines se font à distance à l'aide d'une lunette. Mais le but est atteint : les mesures sont excellentes et vont être publiées à de nombreuses reprises, non sans qu'Arago et Dulong en aient fait une extrapolation jusqu'à 50 atmosphères, quelque peu douteuse et d'ailleurs sans intérêt pratique²⁶. On peut désormais connaître la pression dans les chaudières des machines à vapeur en mesurant simplement leur température, ce qui est très rassurant !

Ici s'arrête, à quelques exceptions près de peu d'importance, la contribution d'Arago aux applications directes de la physique.

Chapitre 11

Le promoteur de la science et de la technique



La locomotive Buddicom,
en usage sur la ligne
Paris-Rouen à partir de 1843
(vue latérale et coupe).

La vulgarisation de la science

François Arago a été un des plus grands vulgarisateurs de la science et de la technique de tous les temps, peut-être le plus grand de tous en France. À une époque qui était dépourvue des moyens audiovisuels actuels, seuls les conférences, les discours et les écrits pouvaient servir à faire connaître et à promouvoir la science et ses applications. Arago les a tous abondamment utilisés : cours public d'astronomie, discours et interventions à l'Académie des sciences et à la Chambre des députés, notices nécrologiques et biographiques qui étaient bien souvent prétexte à expliquer quelque point scientifique et à promouvoir la science, enfin notices scientifiques dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes* et ailleurs. Regardons-les plus en détail.

Le cours public d'astronomie et l'*Astronomie populaire*

C'est à la suggestion de Laplace que le Bureau des longitudes institue en 1812 un cours public d'astronomie. Arago se voit confier ce cours avec enthousiasme, car il se reconnaît « *la manie de faire des leçons* ». Ses qualités de pédagogue et son éloquence attirent bientôt un public beaucoup plus large que prévu. Il donne le cours à l'Observatoire, dans la grande salle de la méridienne dont l'acoustique n'est guère favorable ; puis c'est au Collège de France, un pis-aller, jusqu'à la construction de l'amphithéâtre de l'Observatoire, qui est terminé en février 1841. Arago y fera son cours hebdomadaire jusqu'en 1846, où il sera obligé de s'arrêter après 34 années d'enseignement, en raison de ses nombreuses occupations et de sa santé défaillante. Il existe un remarquable témoignage de l'impact de cet enseignement, sous la forme d'une grande fresque dans le péristyle de la Sorbonne réalisée plus de trente ans après sa mort (figure 11.1).

À partir de 1835, des auditeurs, anonymes ou non, éditent à l'insu d'Arago les notes prises durant ses cours. Lors de la séance de l'Académie du 14 avril 1845, Arago « *a protesté [...] contre la publication d'un livre intitulé : Leçons d'Astronomie professées à l'Observatoire par M. Arago, recueillies par un de ses élèves ; 4^e édition. M. Arago a montré, à l'aide de quelques citations, que cet ouvrage fourmille*



Figure 11.1. Arago donnant son cours d'astronomie populaire dans l'amphithéâtre de l'Observatoire. Fresque de Théobald Chartran (vers 1885) dans le péristyle du Palais académique de la Sorbonne. On voit au fond la statue de Cassini I.

*de bévues vraiment incroyables, et qu'il n'est digne d'aucune attention.*¹ » Or une édition pirate française avait déjà été traduite en anglais dès 1839, et une autre avait paru en Belgique en 1837, elle-même traduite en américain en 1845 avec l'adjonction d'un autre auteur² ! Pour couper court à ces excès, Arago décida de rédiger lui-même son *Astronomie populaire*³ :

« Je me suis décidé à publier ces leçons aujourd'hui si outrageusement défigurées. J'ai dû abandonner des projets de recherches que j'avais formés, et consacrer à la rédaction d'un ouvrage destiné à populariser l'Astronomie un temps que je voulais employer à des expériences délicates, propres à éclairer des points de la science encore enveloppés dans une grande obscurité. Puisse mon traité d'Astronomie populaire avoir quelque utilité ! »

L'*Astronomie populaire* (figure 11.2) reprend beaucoup de textes écrits précédemment, notamment en vue d'un traité d'Astronomie auquel Arago avait songé vers 1832, et éventuellement remis à jour. Pour le reste, il dictera le



Figure 11.2. Page de titre du premier des quatre volumes de *L'Astronomie populaire*.

texte. Mais à qui ? La légende, probablement entretenue par la famille Laugier, prétend que c'est à sa nièce Lucie (figure 11.3). De son côté, Barral, l'éditeur des *Cœuvres complètes* d'Arago, déclare que c'est à Jean-Jacques-Émile Goujon, un des élèves astronomes de l'Observatoire, qu'Arago aurait dicté presque tous ses textes scientifiques après 1849. Il écrit⁴ :

« Préparés de longue main, corrigés un grand nombre de fois, tous les chapitres de *L'Astronomie populaire* ont été revus et complétés par M. Arago, pendant les trois dernières années de sa vie. Aucune des nombreuses figures des pages dictées à M. Goujon n'était faite. Chose singulière et bien remarquable, M. Arago, devenu à peu près aveugle, traçait dans son imagination les figures les plus compliquées, désignait les lignes par des lettres, ainsi qu'on a l'habitude de le faire, puis dictait comme si les figures existaient réellement, sans se tromper jamais. C'est avec le texte seul, ainsi mélangé de lettres désignant des courbes ou des droites, que j'ai dû reconstituer les figures de *L'Astronomie populaire*. »

Il est probable que c'est Barral qui a raison, car on voit mal Lucie, qui n'avait pas de culture scientifique, recueillir des textes et des figures aussi techniques. Quoiqu'il en soit, Arago est mort avant d'avoir pu achever son livre, qui a donc été complété et publié par Barral entre 1854 et 1857. Jamin, qui avait bien connu Arago, dit que



Figure 11.3. Arago dictant *L'Astronomie populaire* à Lucie Laugier. Gravure d'après un bas-relief en bronze d'Antonin Mercié sur le socle de la statue d'Arago à Perpignan (1879). On prétend qu'Humboldt figure sur ce bas-relief, mais ni le personnage debout ni celui du médaillon ne lui ressemblent.

« *l’Astronomie populaire [...] n’est qu’une pâle tentative de reconstruction, sans la chaleur et la vie qu’Arago semait autour de lui* »⁵. Ce jugement peut paraître sévère. Mais il est vrai que l’adjectif « *populaire* », auquel Arago tenait beaucoup, ne rend pas compte du contenu du livre, qui est un véritable traité d’astronomie (sans la mécanique céleste), quoique sans la moindre équation. L’ouvrage est d’un niveau sensiblement plus élevé que ses illustres prédécesseurs : les *Entretiens sur la pluralité des mondes* de Bernard Le Bouyer de Fontenelle (1686) et *l’Astronomie des dames* de Lalande (1785). Les principaux sujets d’intérêt d’Arago y sont particulièrement développés, mais l’ouvrage reste équilibré et offre un excellent panorama de l’astronomie de l’époque. Bien que déjà dépassée sur certains points lors de sa parution, *l’Astronomie Populaire*, qui a connu plusieurs éditions, restera longtemps une excellente introduction à l’astronomie, supérieure à celle que donnera plus tard l’ouvrage éponyme de Camille Flammarion⁶ dont certains aspects sont assez fantaisistes.

Un grave différend va malheureusement affecter la famille Arago après la disparition de François, à propos de l’édition de ses œuvres. Emmanuel et Alfred, ses deux fils, commencent à publier les *Œuvres complètes*. Ils chargent Barral de les collecter et de les éditer pour le compte de l’éditeur Gide et Baudry, auquel on dit qu’ils les ont vendues 100 000 francs. Or Mathieu manifeste son mécontentement à l’Académie après avoir remarqué que le titre du premier volume est *Œuvres complètes de François Arago [...] publiées d’après son ordre sous la direction de M. J.-A. Barral* ; la même mention se trouve aussi dans le titre de *l’Astronomie populaire*. Or, sur son lit de mort, Arago aurait dit à sa sœur Marguerite Laugier et à sa nièce Lucie : « *Vous publierez mes œuvres* » ; et s’adressant à Lucie : « *Tu me le promets, n’est-ce pas ?* » Mathieu en déduit qu’Arago n’a nullement donné à Barral l’ordre de publier ses œuvres. Suit un échange quelque peu confus, dont on retient que c’est l’éditeur qui a fait insérer dans le titre et dans l’introduction de Humboldt les mots incriminés, et que Barral n’y est pour rien⁷. Le résultat de cette controverse est une brouille entre les fils d’Arago et la branche Mathieu-Laugier. L’histoire ressurgit en 1868 à l’occasion de la deuxième édition de *l’Astronomie populaire*⁸ ; mais cette fois l’éditeur remplace le titre par *Astronomie populaire par François Arago [...], deuxième édition, mise au courant des progrès de la science par M. Barral*. Ceci met fin à la

controverse mais ne réconcilie pas pour autant les deux parties. Il est curieux de voir l'Académie étaler au grand jour toute cette histoire, de même d'ailleurs que tous les différends parfois féroces concernant ses membres.

Les discours et les interventions à la Chambre

Nous avons vu au chapitre 2 que pendant la période 1831-1848, où il a constamment siégé à la Chambre des députés, Arago n'y a pas fait moins de 66 discours, dont certains très longs, ainsi qu'un nombre important de rapports et d'interventions sur les sujets les plus variés. Orateur de grande taille, à la voix puissante sans doute teintée d'accent catalan, et totalement dépourvu de timidité, il ne peut manquer d'impressionner son auditoire même si celui-ci est bien souvent loin de lui être acquis. Bien entendu, il profite de ces occasions pour faire l'apologie de la science et de la technique, et aussi pour faire connaître ou défendre des savants et des inventeurs qu'il estime. Quelquefois, il semble oublier qu'il n'est pas à l'Académie des sciences et il assomme les députés en développant des points techniques qui leur passent par-dessus la tête. Mais ce n'est qu'un défaut mineur : ses discours sont généralement bien écrits et agencés, bien que leur style ampoulé, qui est celui de l'époque, nous fasse quelquefois sourire. Leur impact a dû être considérable, encore qu'Arago fasse semblant de le minimiser non sans quelque fausse modestie, en écrivant à la fin de sa vie⁹ :

« Grâce aux bienveillants suffrages des collèges électoraux de Perpignan, de Narbonne, du 12^e et du 6^e arrondissement de Paris, j'ai fait partie durant plus de vingt ans de nos Assemblées législatives. Durant ce long espace de temps, il ne m'était pas venu une seule fois à l'esprit, que les rapports dont mes honorables collègues m'avaient confié la rédaction ; que divers discours prononcés à la tribune, valussent la peine d'être conservés [ils le seront pratiquement tous]. »

Un grand nombre de ces rapports et de ces discours concernent les machines à vapeur et les chemins de fer, ce qui ne saurait nous surprendre au vu de leur importance à l'époque, qui voyait leur plein développement. Nous en reparlerons plus loin, de même que de ceux qui sont consacrés aux chaux et mortiers hydrauliques. Nous avons déjà parlé au chapitre précédent des textes sur les

phares. Chaque fois, Arago fait un historique de la question, toujours très bien documenté, et une mise au point aussi précise et à jour que possible. Un bon exemple est relatif au télégraphe électrique : le 29 avril 1845, on vote sur une somme de 240 000 francs pour essayer des télégraphes électriques¹⁰. Arago, rapporteur, en profite pour faire un historique du télégraphe électrique. Il mentionne un essai de déviation d'une aiguille aimantée qui vient d'être fait avec succès entre Paris et Mantes-la-Jolie, distants de 57 kilomètre, d'abord avec deux fils conducteurs puis avec un seul fil et retour du courant par la terre. Il dit qu'il espère pouvoir refaire l'expérience entre Paris et Rouen « *dimanche prochain* », sans doute avec Breguet, qui n'est pas mentionné¹¹. Puis, pour terminer, il décrit succinctement le système Morse et le système Breguet (voir le chapitre 7). Comment résister à un homme qui connaît si bien les dossiers et qui a une telle force de persuasion ? Le budget est adopté.

Arago défend constamment les constructeurs d'instruments scientifiques. Il essaye de les protéger en améliorant la législation des brevets d'invention, domaine où il est expert¹², et ne manque pas une occasion de leur procurer du travail. Par exemple, il est proposé le 22 mai 1833 à la Chambre des députés d'ajouter 30 000 francs au budget de la marine pour la construction de chronomètres et de cercles à réflexion (sextants ou autres) destinés à la navigation¹³. Pour appuyer ce projet, Arago démontre l'utilité de ces instruments pour déterminer respectivement la longitude et la latitude en mer : il montre que les navires qui ne sont munis que de boussoles font souvent naufrage car la détermination de leur position est incertaine, notamment par manque de connaissance de la déclinaison magnétique^a. Il fait aussi un historique des prix décernés en Angleterre et en France pour la détermination des longitudes, d'où il appert que les Anglais ont été beaucoup plus généreux que les Français. Par ailleurs, Arago rappelle qu'on fabrique beaucoup plus de cercles et de chronomètres en Angleterre qu'en France et que certains navires français n'ont même pas de chronomètre... La Chambre ne résistera pas à ce torrent d'éloquence et à cet argumentaire.

^a On peut y voir aussi une justification des mesures de déclinaison magnétique qu'Arago a faites et rassemblées pendant toute sa carrière : voir le chapitre 9.

Arago essaye évidemment de faire passer à la Chambre ses idées économiques et sociales. Sur le plan de l'économie, son enseignement d'arithmétique sociale à l'École polytechnique (voir le chapitre 2) l'a rendu compétent, et comme il étudie très bien les dossiers, on ne peut guère le contredire. Il est clairement partisan d'une économie libérale mais à préoccupations sociales. Partisan du libre-échange, il est en principe opposé aux droits de douane, sauf pour les « *fortes machines* » à cause de la plus grande cherté des matières premières en France vis-à-vis de l'Angleterre¹⁴. Mais ses opinions sont quelque peu fluctuantes : nous le verrons plus loin à propos des machines à vapeur et des chemins de fer.

À l'Académie des sciences

C'est surtout à l'Académie des sciences, où il est chez lui et où sa position de secrétaire perpétuel le rend tout puissant à partir de 1835, qu'Arago a le loisir de faire passer ses idées. Il serait fastidieux de citer toutes ses interventions et rapports, dont on pourra trouver l'essentiel dans les *Ceuvres complètes*, mais il est intéressant d'insister sur les *Notices biographiques* que le secrétaire perpétuel ou d'autres académiciens sont chargés de lire en séance publique à propos de leurs collègues décédés récemment. Arago porte visiblement une attention particulière à ces notices, qui comportent une biographie très soignée du savant qu'il veut honorer et un historique du sujet de son activité, qui ont encore un grand intérêt pour nous.

Dans sa première biographie, celle de Fresnel lue en 1830, Arago avertit ainsi ses confrères¹⁵ :

« *Cet éloge [...] s'écarte de la forme ordinaire. Je demanderais même qu'on veuille bien le considérer comme un simple Mémoire scientifique dans lequel, à l'occasion des travaux de notre confrère, j'examine les progrès que plusieurs des branches les plus importantes de l'optique ont faits de nos jours. À une époque où les cours du Collège de France, de la Faculté de Paris, du Jardin du Roi [le Muséum d'histoire naturelle], attirent une si grande affluence d'auditeurs, il m'a semblé que l'Académie des Sciences pourrait elle-même entretenir directement le public, ami de nos études, qui veut bien assister à ces réunions, de quelques-unes des questions variées dont elle s'occupe spécialement.* »

On voit ici le désir d'Arago de divulguer les connaissances scientifiques auprès d'un large public. Les trois notices suivantes, consacrées respectivement à Volta, Fourier et Watt (Volta et Watt étaient associés étrangers à l'Académie), ont été lues par Arago comme celle de Fresnel un ou deux ans après le décès de l'intéressé. Puis la situation devient anarchique : les biographies sont lues de nombreuses années, voire plusieurs décennies après la mort du savant honoré. Celles qu'a rédigées Arago sont successivement consacrées à Lazare Carnot, Ampère, Condorcet, Bailly, Monge, Poisson, Gay-Lussac et Malus, ce qui n'est pas du tout l'ordre de leur décès. Ces éloges n'avaient cependant jamais été prononcés auparavant, souvent pour des raisons politiques évidentes. La biographie de Malus¹⁶ (mort en 1812), préparée pour la séance publique de l'Académie des sciences de l'année 1854, a été lue « *par décision spéciale de ce corps savant* » le 8 janvier 1855. Arago était mort depuis plus d'un an.

Bien entendu, Arago choisit les hommes dont il veut parler : ce choix n'est pas neutre et reflète ses opinions politiques démocratiques, voire républicaines. C'est pour lui l'occasion de faire des remarques, de façon très transparente pour les auditeurs de l'époque, sur le régime politique passé ou présent. On a vu au chapitre 2 que l'éloge de Fresnel renferme des allusions aux excès du régime de Charles X, au moment même où va éclater la Révolution de 1830. La notice consacrée à Condorcet en 1841 contient, nous l'avons vu également, des opinions tranchées contre l'esclavage qui préfigurent l'action d'Arago et de Schœlcher en 1848. La lecture de la biographie de Lazare Nicolas Marguerite Carnot¹⁷ (le père de Sadi Carnot), qui date de 1837, montre que c'est l'homme politique plus que le savant qui fascine Arago. On y constate sa haine vis-à-vis de Napoléon qui « *avait confisqué la République à son profit* ». Ce qui l'a intéressé dans l'œuvre scientifique de Lazare Carnot est l'*Essai sur les machines en général* (1783), évidemment en relation avec le Cours de machines qu'Arago a professé à l'École polytechnique, et le *Traité de la défense des places fortes* (1810), car il a longuement discuté de ce problème à propos des fortifications de Paris.

Dès leur parution en 1854 dans les deux premiers tomes des *Œuvres complètes*, les notices biographiques ont fait l'objet, comme d'ailleurs l'*Astronomie populaire*, d'une critique détaillée de Sainte-Beuve, qui en dit :

« La difficulté de composer ces notices, lorsqu'on est Secrétaire perpétuel pour les sciences mathématiques, est très-grande et presque insurmontable, si l'on veut unir toutes les nécessités et les convenances, y compris les convenances oratoires : ou bien l'on néglige et l'on sacrifie en partie l'exposition des travaux de l'homme dont on parle ; ou bien, si l'on entre dans le détail de cet exposé, on devient nécessairement inintelligible par la foule du public, même instruit et lettré, qui assiste à une séance publique de l'Institut. [...] Tenons compte [à Arago] des difficultés d'un tâche dont il s'est acquitté longtemps avec honneur. Ce n'est point sur les dernières Biographies académiques composées par M. Arago qu'il convient de le juger. [...] Maintenant que l'auteur n'est plus, rien n'empêche de dire quelle fut l'impression universelle [à la lecture de la biographie de Gay-Lussac, le 20 décembre 1852]. [...] L'incohérence et la disproportion des parties avaient dépassé toutes les mesures. Prenons M. Arago en son bon temps et dans sa meilleure manière. La notice sur Fresnel, [...] sur Fourier, sur le docteur Young, sur Watt, sont pleines de qualités substantielles et procurent de l'instruction. La Notice sur Carnot ouvre une seconde série en quelque sorte, celles des Notices semi-politiques, telles que les Biographies de Bailly, de Monge, de Condorcet, dans lesquelles l'auteur abonde dans son sens et ne se refuse plus aucune digression ni aucune controverse. Lorsqu'il lisait dans les séances publiques de l'Institut ces Éloges ou plutôt des portions de ces énormes assemblages biographiques (car lire le tout eût été impossible), l'auditoire était souvent fatigué, impatienté ; pourtant on écoutait toujours : il y avait dans la manière de M. Arago, même quand elle choquait, une force qui vous tenait sur place et attentifs. [...] Il nous montre qu'il y a une puissance réelle à ne parler que de ce qu'on sait à fond, et qu'il entre tout autre chose que le goût dans cette prise qu'on a sur les hommes. Il n'est pas jusqu'aux préoccupations cordiales et passionnées que M. Arago a introduites dans ses jugements des savants, qui n'y donnent une certaine vie, tant qu'elle n'excèdent pas la mesure. »

Bel hommage d'un critique littéraire dont on sait la sévérité, et qui ne partage pas le moins du monde les opinions politiques d'Arago.

Réalisant que les journalistes scientifiques sont les meilleurs médiateurs possibles car ils touchent un public beaucoup plus large que les orateurs des cours publics, Arago, devenu secrétaire perpétuel, les autorise non seulement à assister aux séances de l'Académie, mais aussi à consulter les documents discutés lors de ces séances

(figure 11.4). Ce n'est pas du goût de tous ses collègues, et cette dernière disposition sera annulée après sa mort.

Les notices scientifiques

Lorsque Delambre devient en 1807 rédacteur en chef de la *Connaissance des temps* à la mort de Lalande, il opère des changements notables dans ce journal annuel, qui ne contient en plus des tables astronomiques habituelles que des observations et une *Histoire de l'Astronomie*, c'est-à-dire un résumé des recherches astronomiques de l'année. Delambre donne un ton nouveau à ces Histoires en y introduisant des réflexions de fond sur des sujets d'actualité. Puis il introduit progressivement des analyses détaillées d'ouvrages et des articles scientifiques (Arago en écrit un sur les cercles répéteurs¹⁸). Certains sont traduits de l'anglais. On ne constate que peu de changements après la mort de Delambre, survenue en 1822. Puis on trouve une nouvelle rubrique dans la *Connaissance des temps* pour 1827 :

« Le Bureau des longitudes a décidé qu'à l'avenir il serait inséré, chaque année, dans la *Connaissance des Temps*, sous

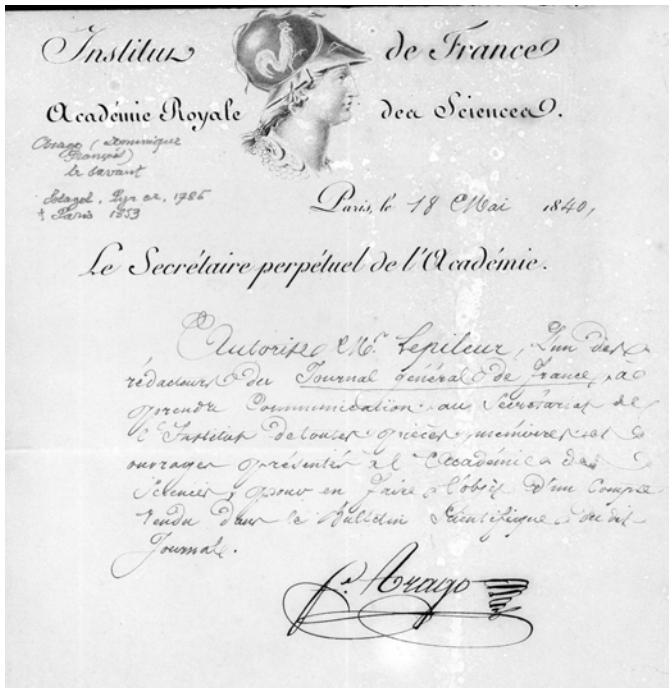


Figure 11.4. Arago autorise un journaliste à consulter les mémoires et les ouvrages qui sont présentés à l'Académie des sciences. Seule la signature est autographe.

le titre de Notices scientifiques, une analyse abrégée des travaux astronomiques, géographiques et hydrographiques dont il aurait eu connaissance. »

C'est Arago qui est chargé de rédiger ces notices. Les deux premières, publiées dans ce même volume, ont pour titre *Sur les dépressions de l'horizon de la mer* (p. 316-323) et *Sur les moyens de soustraire en mer les aiguilles de déclinaison, aux actions qu'exercent les masses de fer répandues dans les bâtiments* (p. 357-362). Ce sont des sujets qui intéressent directement les navigateurs, de même que plusieurs courts textes qui font suite, qui sont aussi de la plume d'Arago. On trouve cependant dans la *Connaissance des Temps* pour 1828 une notice bien différente : *Sur les étoiles multiples, par M. Arago* (p. 297-310), qui expose la découverte déjà ancienne faite par Herschel d'étoiles qui orbitent l'une autour de l'autre. Ceci a beaucoup moins à voir avec ce qui préoccupe le Bureau, et c'est sans doute pourquoi le Bureau des longitudes décide qu'à l'avenir toutes les notices scientifiques seront publiées dans son Annuaire. Il n'y aura que quelques rares exceptions à cette règle.

Arago ne peut que se réjouir de voir toutes ses notices transférées à l'*Annuaire du Bureau des longitudes*, un petit livre annuel bon marché de très petit format, car il est bien mieux distribué que la *Connaissance des temps* qui ne sert guère qu'aux astronomes et aux navigateurs. Il avait déjà écrit de nombreux articles dans cet Annuaire : en 1814, un article *Sur les phénomènes de l'aiguille aimantée*, reproduit avec des changements jusqu'en 1819, puis une *Chronologie des découvertes astronomiques* (1817 et années suivantes) et une *Description des instruments de marine* (1818 et années suivantes). En 1824 on trouve neuf notices rédigées par Arago, et autant en 1825. Il n'y en a pas en 1826. Elles recommencent en 1827, et à partir de 1828 c'est un véritable déluge. Il est difficile dans ce contexte de comprendre la décision de 1827 du Bureau des longitudes de publier à nouveau des notices scientifiques dans la *Connaissance des temps*, décision qui sera d'ailleurs à peine appliquée. Mais peu importe: ces notices scientifiques donnent le meilleur de la vulgarisation d'Arago, et elles seront pour beaucoup dans le succès considérable de l'Annuaire.

Les sujets reflètent toujours ses intérêts scientifiques, qui sont très variés : ils vont de l'astronomie et de la navigation à la physique du globe, l'océanographie, la météorologie, et à différents points de physique (optique, pile électrique) et de technique (machines à vapeur, forage des puits, chaux

et ciments). On y trouve également des extraits de biographies présentées par Arago à l'Académie des sciences (Watt) ou de discours qu'il a prononcés lors de funérailles de divers savants, et une remarquable *Analyse historique et critique de la vie et des travaux de sir William Herschel* (1842), qui est pour lui l'occasion de dévoiler quelques idées nouvelles qu'il a sur les étoiles. Il n'y a pas de notice scientifique d'Arago dans l'Annuaire pour 1847 ; on notera la coïncidence avec l'arrêt de son cours d'astronomie en 1846, certainement causé par un excès de travail et par les progrès du diabète dont il souffre. Les notices ne reprennent qu'après la Révolution de 1848 ; il ne s'agit cependant plus de sujets d'actualité mais d'extraits du matériel qu'Arago est en train de réunir pour son *Astronomie populaire*. On y trouve aussi les biographies de Monge et de Bailly, lues à l'Académie des sciences mais encore inédites. La dernière, qui est celle de Bailly¹⁹ parue en 1853, contient au bas de la première page une note émouvante :

« Lue dans la séance publique de l'Académie des Sciences, le 26 février 1844. Cette biographie est demeurée jusqu'à présent inédite par des raisons bonnes ou mauvaises qu'il serait inutile d'énumérer ici. Je l'imprime aujourd'hui sans y changer un seul mot. Je demande excuse d'avance pour les fautes typographiques et même, s'il y a lieu, pour les incorrections grammaticales qui auront pu se glisser dans les 282 pages qu'on va lire. – Le public, qui m'a toujours honoré de sa bienveillance, aura la bonté de remarquer qu'étant devenu presque complètement aveugle, je n'ai pu présider directement à la révision des épreuves. »

La machine à vapeur et le progrès industriel

Perfectionnements et dangers de la machine à vapeur

La machine à vapeur est l'élément majeur de la révolution industrielle de la fin du XVIII^e siècle et du début du XIX^e siècle. Arago s'y est beaucoup intéressé, et l'un des plans qu'il fait reproduire aux élèves de son *Cours de machines* à l'École polytechnique est celui d'une machine à vapeur de Watt assez perfectionnée (figure 11.5). Il écrit dans

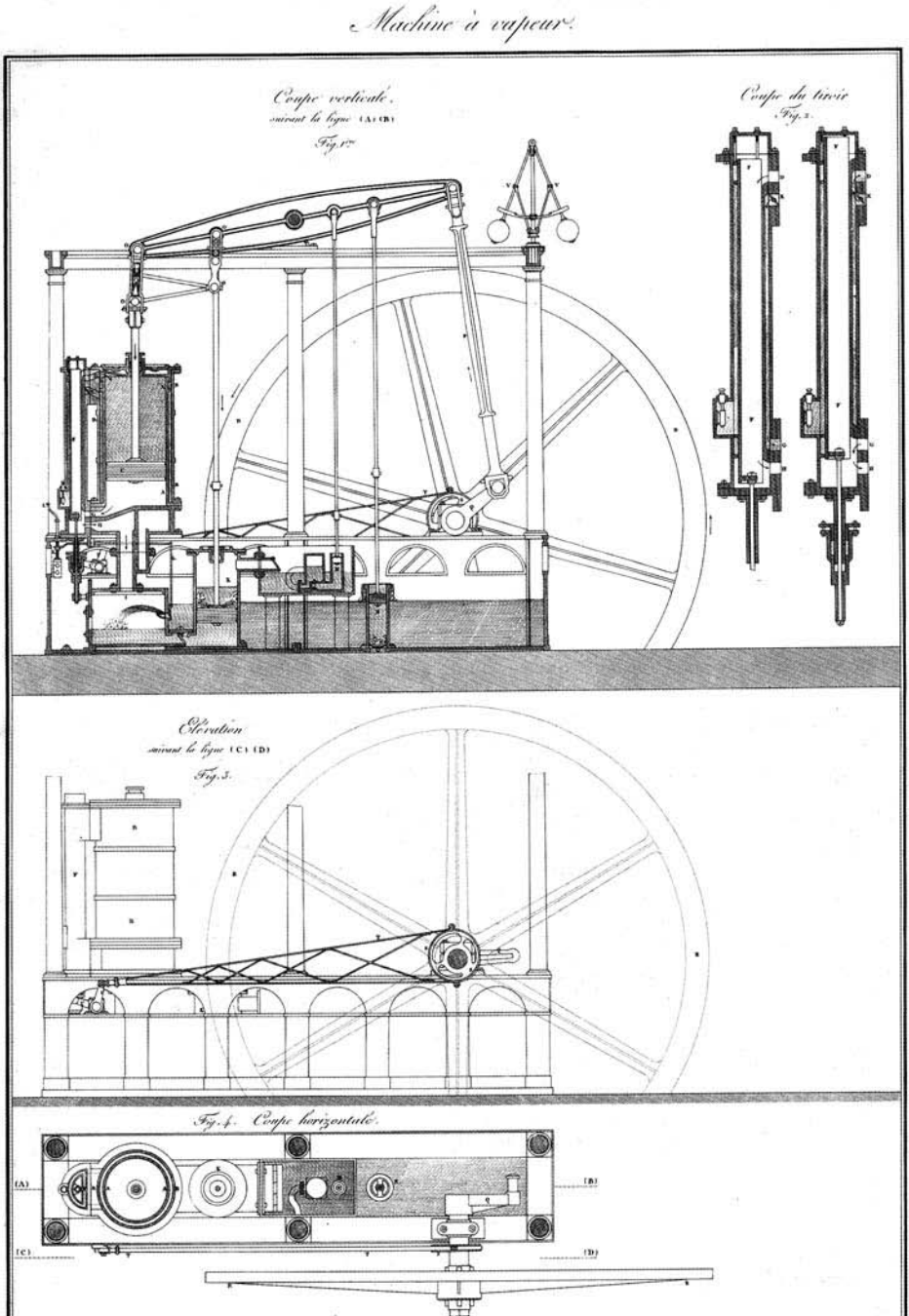


Figure 11.5. Dessin d'une machine à vapeur de Watt, pour le cours de machines d'Arago à l'École polytechnique.

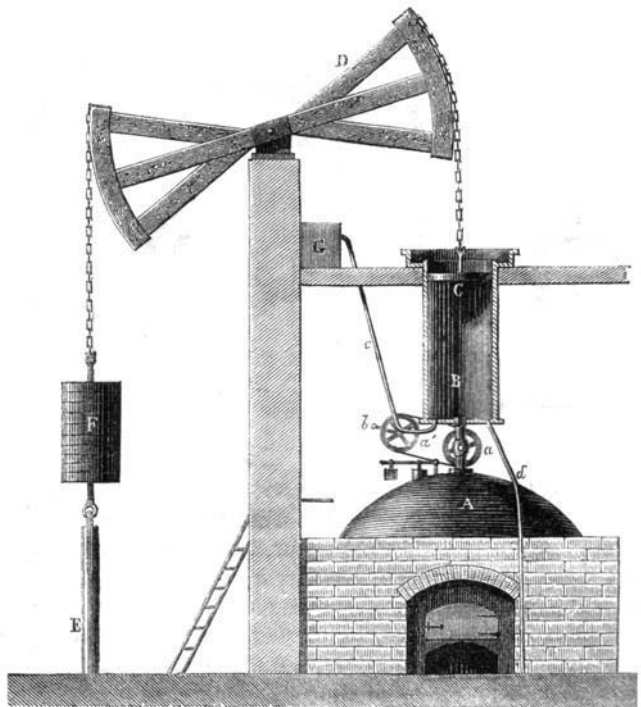
L'Annuaire du Bureau des longitudes pour 1829²⁰ une histoire détaillée de la machine à vapeur, reproduite dans l'Annuaire pour 1830 et dans celui pour 1837. Dans ce dernier, il ajoute un long « *Examen des observations critiques dont la notice précédente a été l'objet* », qui est une discussion sur la priorité des inventions relatives à la machine à vapeur : on sait à quel point Arago est chatouilleux, parfois jusqu'à la mauvaise foi, sur les questions de priorité, surtout quand les inventions contestées sont françaises^b. Dans son *Éloge historique de James Watt*²¹, il reprend une partie de ces textes et y ajoute nombre de considérations relatives à l'économie. La documentation qu'Arago a réunie est impressionnante et, en dépit de ses biais nationalistes, son historique est si bien fait qu'il a été souvent repris par la suite, par exemple par Charles Delaunay en 1850 dans son *Cours de mécanique*²² (encadré 11.1).

Encadré 11.1. Brève histoire de la machine à vapeur, d'après Arago et Delaunay²³

Denis Papin semble être le premier à avoir eu l'idée d'utiliser la vapeur d'eau pour produire du travail. Il a proposé en 1690, puis essayé un appareil où la pression atmosphérique poussait sur un piston de l'autre côté duquel on faisait un vide partiel en condensant de la vapeur d'eau. C'est le principe des « *machines atmosphériques* ». La première machine industrielle construite sur ce principe (figure 11.6), due à l'anglais Newcomen (1705), était employée à l'épuisement de l'eau des mines ; certains exemplaires servaient encore en 1857. Dans sa première version, elle n'était autre que la réalisation en grand de la machine de Papin. Pour

^b Arago n'a pas dû apprécier le commentaire de Sadi Carnot dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (p. 6) : « *Si l'honneur d'une découverte appartient à une nation où elle a acquis tout son accroissement, tous ses développemens, cet honneur ne peut être ici refusé à l'Angleterre : Savery, Newcomen, Smeathon, le célèbre Watt, Woolf, Trevetick et quelques autres ingénieurs anglais, sont les véritables créateurs de la machine à feu ; elle a acquis entre leurs mains tous ses degrés successifs de perfectionnement. Il est naturel, au reste, qu'une invention prenne naissance et surtout se développe, là où le besoin s'en fait le plus impérieusement sentir.* »

Figure 11.6. La machine atmosphérique de Newcomen. Le cylindre B contenant le piston C est ouvert à sa partie supérieure. On introduit dans la partie inférieure du cylindre de la vapeur provenant de la chaudière A, puis on injecte une petite quantité d'eau froide provenant du réservoir G. La vapeur se condense, et la pression atmosphérique sur la partie supérieure du piston le fait descendre, produisant le travail. Lorsqu'il est en bas, on évacue l'eau condensée, on introduit à nouveau de la vapeur, et le processus recommence. La machine actionne la tige E de la pompe d'épuisement d'une mine. Le poids de cette tige et le poids additionnel F font remonter le piston tandis qu'on injecte la vapeur. Les robinets d'injection et d'évacuation sont commandés par des rouages mus par la machine.



condenser la vapeur introduite par la chaudière dans la partie inférieure du cylindre, on l'arrosait d'eau, mais ce moyen n'agissait que lentement. On réalisa ensuite qu'en injectant de l'eau froide dans le cylindre, la condensation était considérablement accélérée. Au début, un homme devait manœuvrer le robinet d'injection de l'eau froide et celui par lequel s'évacuait de l'eau condensée dans le bas du cylindre, mais on imagina qu'on pouvait les commander par un système de roues actionnées par la machine elle-même, ce qui lui permettait de fonctionner toute seule. À partir de 1769, James Watt introduisit des principes nouveaux qui sont à l'origine des machines ultérieures. Tout d'abord c'était la pression de la vapeur elle-même qui actionnait le cylindre, et non la pression atmosphérique (figure 11.5 et figure 11.7). Puis cette vapeur se condensait dans un récipient séparé du piston et maintenu à basse température par injection d'eau, le condenseur. Le mouvement était transmis par un système de bielles et de

manivelles, et un excentrique permettait d'actionner un tiroir qui introduisait et évacuait la vapeur au moment voulu. Pour éviter l'emballement de la machine, Watt y adjoignait un régulateur centrifuge qui diminuait l'admission de la vapeur si la vitesse de la machine augmentait. Enfin, certaines de ses machines étaient à double effet, la vapeur agissant alternativement sur les deux côtés du cylindre. Leur rendement était cependant très faible car la vapeur était introduite à une pression peu supérieure à la pression atmosphérique, et l'on n'utilisait pas sa détente. Watt s'était rendu compte de ce défaut et avait même pris un brevet au sujet de la détente de la vapeur dans les cylindres, mais la réalisation pratique lui est postérieure. On construisit aussi des machines à haute pression, ordinairement 4 à 6 fois la pression atmosphérique, dont le rendement était bien supérieur ; dans ce cas, le condenseur pouvait être supprimé, car il suffisait d'évacuer la vapeur dans l'atmosphère, ce qui revenait à avoir un condenseur à 100°C ; c'était commode sur les locomotives, mais on avait cependant intérêt à conserver un condenseur plus froid dans les machines fixes. Parmi les perfectionnements de principe après Watt, les plus importants furent l'invention en 1828-1829 par Marc Seguin du tirage forcé des chaudières par injection de vapeur dans la cheminée (figure 11.8), et de la chaudière tubulaire où la surface de chauffe de l'eau est très grande pour un volume total raisonnable (voir les figures sous le titre de ce chapitre). Ces perfectionnements furent aussitôt appliqués aux locomotives. De son côté, l'anglais Hornblower a inventé la double expansion, réalisée par Arthur Woolf dès 1804 (figure 11.9), mais qui ne fut appliquée aux locomotives que dans la deuxième moitié du XIX^e siècle. On a construit encore plus tard des locomotives où la vapeur se détend successivement dans trois cylindres de diamètre croissant.

On a l'intuition, vérifiée par l'expérience et étayée par la démonstration de Sadi Carnot dont nous parlerons un peu plus loin, que les machines à haute pression ont un rendement supérieur aux machines à basse pression. Comme elles sont aussi moins encombrantes, notamment grâce à la suppression éventuelle du condenseur, elles conviennent

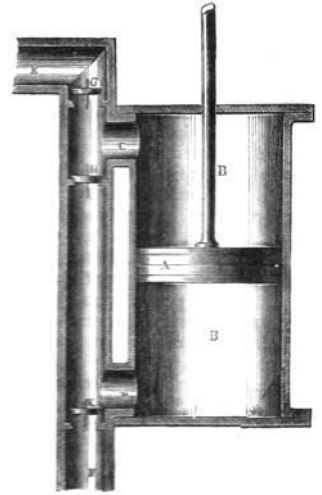


Figure 11.7. Principe de la machine à vapeur de Watt à simple effet. Le piston peut se déplacer dans un cylindre fermé aux deux extrémités. La vapeur produite par la chaudière arrive par le tuyau du haut E. On ouvre la soupape supérieure G et ferme la soupape intermédiaire H : la pression de la vapeur fait descendre le piston, qui produit le travail, et, la soupape inférieure K étant ouverte, la vapeur précédemment introduite sous le piston s'échappe vers le condenseur. On ferme ensuite les soupapes G et K et on ouvre la soupape H, ce qui permet au piston de remonter librement grâce à l'inertie d'un volant qu'il actionne, tandis que la vapeur située au dessus est transférée en dessous. Le cycle peut alors recommencer.

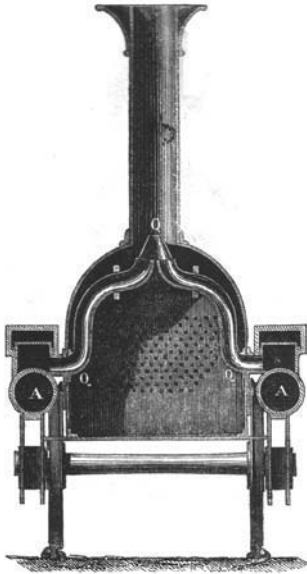


Figure 11.8. Coupe transversale de la locomotive Buddicom au niveau de la cheminée. On peut voir la sortie des tubes de la chaudière, où circulent les fumées, et les deux tuyaux qui amènent la vapeur sortant des cylindres vers la buse Q, où elle entraîne les fumées, forçant ainsi le tirage de la chaudière.

bien mieux aux locomotives. Mais ces machines à haute pression auront bien du mal à s'imposer, à cause du danger d'explosion. Arago, qui est bien conscient de ce danger après ses mesures de la pression de vapeur avec Dulong, est cependant un fervent avocat de ces machines, quitte à en occulter quelque peu le danger à l'occasion.

Un premier rapport sur la sécurité des machines à vapeur à basse et à haute pression est lu en 1822 à l'Académie des sciences par une commission présidée par le baron Charles Dupin²⁴. Ce texte recommande qu'il y ait deux soupapes de sûreté sur chaque machine, que les chaudières soient éprouvées à une pression 4 à 5 fois plus grande que celle qu'elles devront supporter, que les fabricants fassent connaître cette pression, et qu'on mette un mur d'un mètre d'épaisseur autour des machines proches des habitations. Il conclut par cette remarque générale :

« La Commission [...] est partie de ce principe, que tout moyen mécanique entraîne avec lui ses dangers, et qu'il suffit que ces dangers ne dépassent pas une chance de probabilité très-faible pour qu'on doive, nonobstant leur possibilité, continuer d'employer les procédés d'industrie qui les font naître. »

Comme Arago est jugé particulièrement compétent sur les dangers d'explosion des machines à vapeur, il va écrire plus tard pour l'Académie un long rapport sur ce sujet²⁵. On y trouve un compte rendu de diverses explosions, dont celle survenue le 4 mars 1827 aux essais à Lyon du bateau Le Rhône, construit par Aitkin et Steel, dont la chaudière avait été « parfaitement bien exécutée » à Paris dans les ateliers de la Gare. Il y eut de nombreux morts, dont Steel lui-même, qui avait bloqué les soupapes de sécurité ! Ceci n'était pas rare : Arago cite d'autres explosions dues à une surcharge involontaire ou volontaire des soupapes de sécurité. On place souvent des rondelles de métal fusible sur la paroi des chaudières, mais Arago mentionne que « lorsque les chauffeurs veulent pousser le feu plus que de coutume, ils savent très-bien, pour prévenir la fusion de la plaque, diriger sur sa surface un courant continu d'eau froide ». Il fait aussi des « Remarques relatives aux prétendus dangers des machines à haute pression » où il indique que les chaudières sont essayées « à la presse hydraulique » sous trois fois la pression nominale, et rappelle ses propres essais avec Dulong. Il conclut avec satisfaction : « La plupart des dispositions que nous avons conseillées, nous sommes heureux de le dire, ont été adoptées par le gouvernement. »

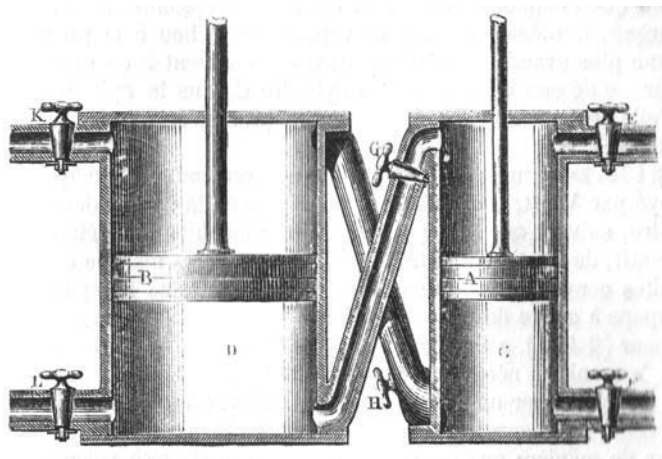


Figure 11.9. Principe de la machine à deux cylindres de Woolf. Cette machine utilise la détente de la vapeur et est à double effet. Les deux pistons sont solidaires et se déplacent donc en parallèle. L'admission de la vapeur se fait d'abord en haut à droite (des robinets sont dessinés pour la facilité de l'explication, on emploie en réalité des tiroirs). La vapeur pousse le piston A vers le bas et, le robinet H étant ouvert, la vapeur introduite précédemment dans le bas du cylindre est poussée vers le haut du gros cylindre, où elle agit sur le piston car le robinet K est fermé et le robinet L ouvert. Lorsque les pistons sont au bas de leur course, les robinets E, H et L se ferment et les trois autres s'ouvrent. La vapeur introduite par le robinet du bas F dans le petit cylindre pousse le piston A vers le haut, tandis que la vapeur qui se trouvait au dessus passe dans le gros cylindre et pousse le piston B également vers le haut, tandis que celle qui était dans le haut du gros cylindre s'échappe. La force totale est supérieure à celle que l'on aurait avec le seul petit cylindre.

La naissance de la thermodynamique

La théorie de la machine à vapeur était bien moins avancée que sa pratique, car elle n'a pu être établie que quand le travail de Sadi Carnot (figure 11.10) a été compris et assimilé. Il nous paraît intéressant de consacrer quelques lignes à ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu*²⁶ de 1824, qui est le véritable texte fondateur de la thermodynamique.

Carnot utilise indifféremment le terme de quantité de chaleur ou de celui de calorique, qui était standard à l'époque. Contrairement à beaucoup de scientifiques contemporains, il ne semble pas se préoccuper de la nature du calorique, sur laquelle deux idées s'affrontent. Pour Lavoisier, son créateur en 1783, le calorique était

^c Il y en a même trois selon CErsted (voir le *Journal de Physique* 80, 1815, p. 5-99) : « La Théorie mécanique est celle des anciens chimistes qui [...] ont regardé la chaleur comme la suite des mouvemens qui ont lieu entre les particules des corps. Ils n'admettent point, par conséquent, une matière particulière de la chaleur. La Théorie chimique est celle des chimistes modernes, qui [...] ont admis une matière calorifique qui peut s'unir librement avec les corps ou s'en séparer, tantôt à l'état libre, tantôt à l'état latent. La Théorie dynamique de la chaleur est celle des physiciens qui supposent qu'il y a dans la nature deux forces répandues, qui sont la base de toutes les actions chimiques et mécaniques. Ces forces sont analogues aux deux espèces d'électricité, la positive et la négative. » Mais cette dernière théorie semble peu populaire.



Figure 11.10. Sadi Carnot (1796-1832) en uniforme de polytechnicien.

un « *fluide subtil* » qui coulait des corps chauds vers les corps froids²⁷. Initialement, on considérait que la quantité totale de calorique dans l'Univers était constante (conservation de la chaleur), mais cette idée fut ultérieurement abandonnée. Pour d'autres comme Babinet²⁸, la chaleur consistait dans les vibrations des « *molécules* » des corps, ce qui est l'idée actuelle ; bien que plus ancienne, car elle remonte au suisse Daniel Bernoulli²⁹, le créateur en 1738 de la théorie cinétique des gaz, cette théorie des vibrations avait moins d'impact que celle du calorique, qui était défendue par des savants aussi prestigieux que Laplace ou Poisson³⁰.

Mais revenons à Carnot. Il se place dans le cadre de la théorie du calorique, ce qui ne diminue en rien l'intérêt de son ouvrage. Tout d'abord, il est clair qu'il comprend que la chaleur peut se transformer en travail, et inversement. Plus précisément, il conçoit le fonctionnement d'une « *machine à feu* » comme un transport de calorique d'une source chaude (la chaudière) à une source froide (le condenseur), tandis qu'il y a simultanément production de « *puissance motrice* » dans le cylindre. Il montre ensuite — c'est sa découverte essentielle — que cette puissance motrice ne peut dépasser une certaine quantité qui dépend de la différence de température entre les deux sources : il développe l'analogie avec la puissance d'une chute d'eau, qui ne peut dépasser ce que peut fournir la hauteur de la chute. Ce maximum de puissance est tel que (p. 38)

« la puissance motrice de la chaleur est indépendante des agens mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique. »

Carnot démontre aussi empiriquement, à partir des lois qu'il a établies sur la chaleur spécifique des gaz, que

« la chute du calorique produit plus de puissance motrice dans les degrés inférieurs que dans les degrés supérieurs, »

c'est-à-dire que cette puissance est plus grande par exemple, quand on passe de 100 °C à 0 °C que quand on passe de 200 °C à 100 °C. Nous ne sommes pas loin de la loi qui dit que le rendement d'une machine thermique ne peut dépasser $(T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}})/T_{\text{froid}}$, où T est la température absolue, exprimée en degrés Kelvin (température en degrés Celsius + 273). Mais, faute de données, Carnot ne parvient pas à une loi quantitative, qui devra attendre

Rudolph Clausius et Lord Kelvin. Il déduit cependant de sa théorie les principes suivants concernant les machines à feu :

« 1° La température du fluide [gaz] doit être portée d'abord au degré le plus élevé possible, afin d'obtenir une grande chute de calorique, et par suite une grande production de puissance motrice.

2° Par la même raison le refroidissement doit être porté aussi loin que possible.

3° Il faut faire en sorte que le passage du fluide élastique de la température la plus élevée à la température la plus basse soit dû à l'extension de volume [c'est l'expansion dans le cylindre de la machine à vapeur], c'est-à-dire il faut faire en sorte que le refroidissement du gaz arrive spontanément par l'effet de la raréfaction. »

La nouveauté de l'ouvrage de Carnot est absolue, et l'abord en a sans doute été difficile à l'époque. Il s'en rendait compte lui-même en écrivant : « La matière ici traitée étant tout à fait nouvelle, nous sommes forcés d'employer des expressions encore inusitées et qui n'ont peut-être pas toute la clarté désirable. » Les principes qu'il contient ont-ils été bien compris de ses contemporains ? On peut en douter, et Carnot ne manque pas de citer de nombreuses réalisations qui s'écartent de ces principes, par exemple en ne tirant pas parti de l'expansion de la vapeur dans les cylindres.

Quelques curiosités

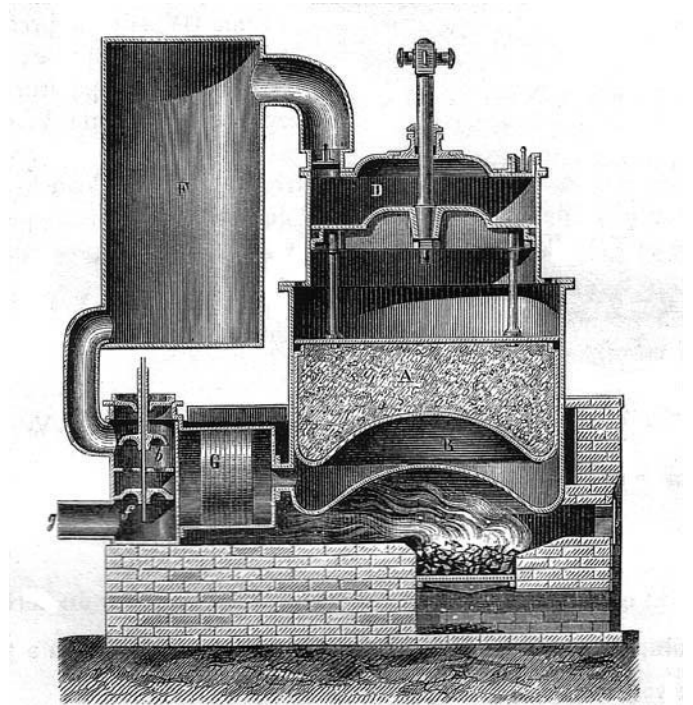
Dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, Carnot fait judicieusement remarquer que « les vapeurs de tous les corps susceptibles de passer à l'état gazeux, de l'alcool, du mercure, du soufre, etc., pourraient remplir le même office que la vapeur d'eau ».

De fait, on a construit des moteurs « à vapeurs combinées », dits aussi « machines binaires » à éther, à sulfure de carbone, à perchlorure de carbone et à chloroforme ; il est intéressant d'en dire quelques mots. Il s'agit ici d'utiliser comme condenseur d'une machine à vapeur une chaudière où l'on fait bouillir un liquide plus volatil que l'eau : on peut ainsi récupérer une partie de la chaleur latente résiduelle de la vapeur d'eau. En détendant la vapeur de ce liquide volatil ainsi formée dans un cylindre auxiliaire fonctionnant en parallèle avec celui où se détend la vapeur

Figure 11.11. Principe d'un des moteurs à air chaud conçus par Ericsson. Un cylindre contient deux pistons superposés solidaires l'un de l'autre, de diamètres différents ; celui du bas (A) est épais et rempli d'un isolant thermique. Lorsqu'il monte sous la pression de l'air chauffé par le feu en dessous, les deux soupapes f et b en bas à gauche étant fermées, il fournit l'énergie en poussant le piston supérieur et une tige qui actionne un mécanisme non représenté. Le piston supérieur envoie par une soupape l'air du volume D situé au-dessus de lui dans le réservoir à air comprimé F, où la pression est à peu près constante. Lorsque les pistons sont arrivés en haut, ils redescendent grâce à un volant d'inertie (non représenté). La soupape f est cette fois ouverte et la soupape b fermée, si bien que l'air situé sous le piston du bas est évacué en g. La soupape à droite du volume D s'ouvre, et de l'air frais entre dans ce volume ; puis la soupape f se ferme, la soupape b s'ouvre et de l'air du réservoir F est introduit dans le volume B sous le cylindre A. On trouve en G des toiles métalliques servant de récupérateur de chaleur : elles sont chauffées par l'air évacué depuis le volume B puis préchauffent l'air frais qui provient du réservoir F.

d'eau on dispose d'un supplément de puissance. On trouve par exemple dans les *Comptes rendus* de 1848 une lettre d'Arago, alors Ministre de la marine et des colonies, intitulée « *Questions relatives à l'emploi de la vapeur du chloroforme dans un des cylindres des machines binaires* »³¹. Arago y demande des nouvelles d'essais effectués par la marine avec une telle machine à éther, et charge une commission de l'Académie d'examiner la proposition du citoyen Lafond de remplacer l'éther, jugé dangereux, par le chloroforme. Inutile de dire que les machines « à vapeurs combinées » ont vite été abandonnées en raison des pertes inévitables du liquide volatil, dont le prix est élevé.

Plus intéressantes sont les machines à air chaud. Carnot indique que n'importe quel gaz, l'air en particulier, peut être utilisé pour réaliser un moteur thermique sans utiliser la vaporisation et la liquéfaction. L'intérêt est que l'on n'a plus à fournir l'énergie nécessaire à évaporer un liquide, énergie qu'il est difficile de récupérer par la suite comme on vient de le voir. La figure 11.11 décrit un exemple de machine à air chaud, due à l'américain



John Ericsson ; c'est une adaptation de la machine construite en 1816 par le pasteur écossais Robert Stirling, que l'on considère souvent comme l'inventeur des machines à air chaud alors qu'elles étaient connues depuis quelque temps et qu'il n'a fait que les perfectionner. Ce type de machine, qui peut atteindre un rendement de 30 %, a connu un renouveau dans les années 1930 et est toujours employé pour certaines applications.

Carnot regrette que la source chaude des machines à vapeur ne puisse pas atteindre une température très élevée car la pression est limitée (160 °C pour 6 atmosphères), alors que le charbon en ignition est à une température bien plus grande. Les machines à air chaud de type Stirling ou Ericsson peuvent fonctionner à une température plus élevée et ont donc un meilleur rendement. Mais si l'on pouvait injecter dans le cylindre une substance inflammable, réalisant ainsi un moteur à combustion interne, on pourrait encore y augmenter la température donc le rendement. Un des premiers essais de ce type date de 1807. Il est dû à Nicéphore Niepce, un des inventeurs de la photographie (figure 11.12), et à son frère aîné Claude. Leur invention est ainsi décrite par Carnot³² :



Figure 11.12. Nicéphore Niepce (1765-1833).

« Parmi les tentatives faites pour développer la puissance motrice du feu par l'intermédiaire de l'air atmosphérique, on doit distinguer celles de MM. Niepce, [...] au moyen d'un appareil nommé par les inventeurs pyrèlophore. [...] C'était un cylindre, muni d'un piston, où l'air atmosphérique était introduit à la densité ordinaire. L'on y projetait une matière très-combustible, réduite à un grand état de ténuité, et qui restait un moment en suspension dans l'air, puis on y mettait le feu. L'inflammation produisait à peu près le même effet que si le fluide élastique eût été un mélange d'air et de gaz combustible [...] ; il y avait une sorte d'explosion et une dilatation subite du fluide élastique, dilatation que l'on mettait à profit en la faisant agir tout entière contre le piston. [...] Cette machine, fort ingénieuse et intéressante surtout par la nouveauté de son principe, péchait par un point capital. La matière dont on faisait usage comme combustible (c'était la poussière de lycopode^d, employée à produire

^d Spores de *Lycopodium*, plante sans fleurs qui pousse dans des endroits humides des montagnes. On utilisait encore la poudre de lycopode dans les lycées, il y a quelques dizaines d'années, pour mettre en évidence des ondes sonores stationnaires.

des flammes sur nos théâtres) était trop chère pour que tout avantage ne disparût pas par cette cause. »

Il ajoute :

« Au lieu d'opérer comme le faisaient MM. Niepce, il nous eût semblé préférable de comprimer l'air par des pompes pneumatiques, de lui faire traverser un foyer parfaitement clos, et dans lequel on eût introduit le combustible en petites portions par un mécanisme facile à concevoir ; de lui faire développer son action dans un cylindre à piston. »

On voit ici en germe quelques uns des éléments du moteur à combustion interne : carburateur et même compresseur, et bien entendu cylindre et piston. Cependant Carnot semble avoir ignoré que le premier moteur à explosion, utilisant l'hydrogène, avait été construit en 1805 par le suisse Isaac de Rivaz. Ce moteur, de même que celui des frères Niepce, ne sera jamais commercialisé. Il revient au belge naturalisé français Jean-Joseph Étienne Lenoir l'honneur d'avoir réalisé en 1860 et commercialisé à 400 exemplaires le premier moteur à combustion interne, un moteur à 2 temps qui fonctionnait au gaz d'éclairage et développait 2 chevaux-vapeur (1,5 kilowatt). Lenoir a également construit en 1863 le premier moteur à quatre temps, dont le principe avait été décrit l'année précédente par Alphonse Eugène Beau de Rochas. Il fera également circuler en 1863 la première automobile, qui mettra 3 heures à couvrir 18 km de Paris à Joinville le Pont. L'histoire qui suit est trop connue pour être développée ici.

L'impact économique et social de la machine à vapeur

On ne s'étonnera pas de l'enthousiasme suscité par la machine à vapeur dans les milieux scientifiques et dans la bourgeoisie. On y voit évidemment un facteur de progrès économique, mais aussi de progrès social. Parmi les nombreux témoignages, on peut citer celui du baron Dupin, qui fait le 24 avril 1821, dans la séance générale des quatre Académies de l'Institut royal de France, un *Discours sur quelques avantages de l'industrie et des machines en France et en Angleterre*. On lit dans le compte rendu de cette séance³³ :

« [M. Dupin] montre combien sont peu fondés les reproches qu'on a cru devoir faire aux machines, d'ôter à l'indigent des moyens de travail et d'existence. Il fait voir au

contraire que la masse du peuple est plus heureuse et jouit d'une aisance plus réelle, par la plus grande abondance de produits que fabriquent les machines pour satisfaire aux besoins, aux plaisirs, au luxe des hommes. »

Même son de cloche chez Arago, dans son *Éloge historique de James Watt*³⁴ lu lors de la séance publique de l'Académie des sciences le 8 décembre 1834. Le style est caractéristique de l'époque :

« Les grandes forces mécaniques qu'il fallait aller chercher dans les régions montagneuses, au pied des rapides cascades, [il s'agit des moulins à eau] grâce à la découverte de Watt, naîtront à volonté, sans gêne et sans encombrement, au milieu des villes, à tous les étages des maisons.

« L'intensité de ces forces variera au gré du mécanicien ; elle ne dépendra pas, comme jadis, de la plus inconstante des causes naturelles : des météores atmosphériques.

« Les diverses branches de chaque fabrication pourront être réunies dans une enceinte commune, sous un même toit.

Les produits industriels, en se perfectionnant, diminueront de prix.

« La population, bien nourrie, bien vêtue, bien chauffée, augmentera avec rapidité ; elle ira couvrir d'élégantes habitations toutes les parties du territoire. [...]

« Installée sur les navires, la machine à vapeur remplacera au centuple les efforts des triples, des quadruples rangs de rameurs, à qui nos pères, cependant, demandaient un travail rangé parmi les châtiments des plus grand criminels. [...] Les traversées deviendront beaucoup plus rapides ; le moment de l'arrivée des paquebots pourra être prévu comme celui des voitures publiques. [...]

« La machine à vapeur, enfin, traînant à sa suite des milliers de voyageurs, courra, sur les chemins de fer, beaucoup plus vite que le meilleur cheval de race chargé seulement de son svelte jockey. [...]

« Dans quelques années, [...] [les] sybarites, incessamment poussés par la vapeur sur des chemins de fer, pourront visiter rapidement les différentes régions du royaume. Ils iront, dans le même jour, voir appareiller notre escadre à Toulon ; déjeuner à Marseille avec les succulents rougets de la Méditerranée ; plonger à midi leurs membres éternés dans l'eau minérale de Bagnères, et ils reviendront le soir par Bordeaux au bal de l'Opéra. »

C'est aller un peu vite en besogne : malgré le TGV, nous n'en sommes pas encore là !

Cet enthousiasme est un peu tardif : la France accuse un retard important vis-à-vis de l'Angleterre. D'après Arago³⁵ (discours devant la Chambre des députés du 29 mai 1835), il y avait déjà en Angleterre en 1819 environ 10 000 machines à vapeur « *d'une force totale de 600 000 chevaux ou de à 3 ou 4 millions d'ouvriers [sic]* ». Mais en 1835, il n'y a encore en France que 1 000 machines donnant 14 000 chevaux. Arago recommande donc la construction de machines puissantes en France, en citant trois constructeurs possibles : François Cavé à Paris, Hallette à Arras, et Gengembre à Indret. Mais se pose le problème des droits de douane, et ici Arago, partisan du libre échange, est en contradiction avec lui-même. En effet, les machines anglaises sont d'un tiers moins chères que les machines françaises, en raison du coût moins élevé en Angleterre des matières premières nécessaires à leur construction. Ceci est compensé par un droit de douane de 33 % pour l'importation des machines anglaises.

En 1837, on a abaissé le droit de douane à 15 %, et les constructeurs anglais ont fortement réduit leurs prix si bien que la protection douanière n'est plus efficace. Aussi Arago, qui ne demande pas le relèvement du droit de douane, présente-t-il à la Chambre des députés le 16 juin 1840 un amendement à un projet de loi sur l'établissement de divers chemins de fer, ainsi conçu³⁶:

« Les neuf dixièmes au moins des machines locomotives dont la compagnie fera usage, devront être exécutées en France : Cette prescription cesserait d'être obligatoire, dans le cas où le prix des machines françaises surpasserait le prix moyen des machines anglaises de plus de 15 pour 100. »

Les chemins de fer français possèdent alors 59 locomotives françaises contre 97 anglaises. Le nombre de constructeurs a augmenté : Arago cite les Ateliers d'Anzin, la Compagnie du Creusot dirigée par Adolphe et Eugène Schneider, les établissements d'Édouard Stehelin et Nicolas Koechlin à Mulhouse, celui de Cavé à Paris, la Compagnie de St. Étienne à Lyon, la Compagnie générale de matériel de chemin de fer créée par le belge Pauwels, et l'Atelier de La Ciotat. Cette liste est d'ailleurs incomplète. Tous les arguments sont bons pour pousser la construction des locomotives en France : Arago cite pour illustrer la qualité des produits français le succès en Angleterre des lunettes astronomiques de Cauchoix, ce qui n'a pas grand-chose à voir à l'affaire.

Les efforts d'Arago n'auront pas tout de suite le succès escompté : l'amendement est renvoyé à la Commission des finances et enterré. Les mesures de protection ne seront obtenues qu'en 1844, et l'on continue à importer des machines anglaises de Sharp-Roberts et de Robert Stephenson, afin « *de nous procurer, ne fût-ce que comme point de comparaison, quelques machines sorties des ateliers des deux constructeurs, qui se trouvent en Angleterre placés à la tête de l'industrie* »³⁷. Malgré les inventions de Seguin, les machines françaises ne sont guère que des copies de machines anglaises, notamment de celles de Robert Stephenson et de Thomas Russell Crampton en ce qui concerne les locomotives. Mais l'industrie est née, et deux compagnies vont la dominer pendant plusieurs décennies : celle de Koechlin et celle du Creusot.

Les chemins de fer³⁸

Les débuts

Comme pour les machines à vapeur, la France est en retard par rapport à l'Angleterre et même aux États-Unis en ce qui concerne les chemins de fer³⁹. Il existe bien depuis 1828 une voie ferrée de 20 km de long dans le bassin houiller de la Loire, entre Andrézieux et Saint-Étienne. Elle sert à transporter du charbon, et la traction est assurée par des chevaux malgré la forte pente, le retour se faisant par gravité. En 1832, cette ligne est ouverte aux voyageurs, mais la traction animale n'est remplacée qu'en 1844 par la traction vapeur. De leur côté, les cinq frères Seguin et Édouard Biot, fils du savant Jean-Baptiste Biot, obtiennent en 1826 l'adjudication d'une ligne de chemin de fer reliant Saint-Étienne à Lyon, qui est terminée en 1832. À l'instar de certaines lignes anglaises que les Seguin connaissent bien, elle a une pente régulière, ce qui a nécessité de nombreux ouvrages d'art, dont 14 tunnels. Les locomotives à vapeur qui assurent la montée (la descente se faisant par gravité) sont construites par Marc Seguin qui y place sa chaudière tubulaire et le tirage forcé dont nous avons parlé précédemment (voir l'encadré 11.1, les figures sous le titre de ce chapitre et la figure 11.8). Les autres éléments sont copiés sur des machines de Robert Stephenson dont on avait importé deux exemplaires. On transporte

sur cette ligne du charbon, mais aussi des voyageurs, d'abord dans des wagons de marchandises, puis dans des wagons spéciaux. On construit également une ligne entre Andrézieux et Roanne, prolongeant celle de Saint-Étienne à Andrézieux ; ouverte en 1834, elle comporte de fortes pentes où les trains sont tractés par des câbles tirés par des machines à vapeur fixes.

Ces premières lignes sont donc principalement destinées à acheminer des marchandises pondéreuses soit vers des grandes villes (Lyon), soit vers des rivières (le Rhône) ou des canaux que l'on construit alors activement (les canaux de Roanne et de Briare). Le transport des voyageurs n'est pas une priorité, d'autant plus que la vitesse des trains ne dépasse pas celle des diligences. Le financement se fait par actionnariat, mais la grande banque se tient à l'écart de ces entreprises sans doute jugées trop risquées, d'autant plus qu'elles souffrent vers 1829-1830 des conséquences d'une crise économique passagère. D'ailleurs on investit beaucoup dans les canaux et pour l'amélioration des routes ; le chemin de fer est encore dans un état si expérimental que l'on préfère souvent attendre.

Cependant des voix s'élèvent à partir de 1832 en faveur du chemin de fer. Des textes inspirés par Saint-Simon paraissent dans les journaux, présentant au public cultivé un programme d'édification d'une société industrielle dont le chemin de fer est une composante essentielle. Quatre ingénieurs (Gabriel Lamé, Émile Clapeyron, Eugène et Stéphane Flachet) publient en 1832 les *Vues politiques et pratiques sur les travaux publics en France*, bien argumentées sur le plan technique. Deux banquiers importants, Émile et Isaac Pereire, prônent l'association de la banque et de l'État pour assurer le développement d'un réseau ferré. Sur le plan pratique, l'ingénieur des Ponts et Chaussées Paulin Talabot, qui devait devenir un des hommes d'affaires les plus brillants du siècle, s'associe au maréchal Soult pour créer une ligne reliant Alais (aujourd'hui Alès) aux mines de la Grand-Combe, dans le cadre d'un vaste projet minier et sidérurgique, et une autre d'Alais à Beaucaire. On assiste ainsi à la création d'un véritable lobby ferroviaire. Dès 1833, la Chambre des députés ouvre sur la proposition d'Adolphe Thiers un crédit de 500 000 francs pour réaliser des études, et fixe un cadre juridique, à vrai dire assez contraignant, pour la construction et l'exploitation des chemins de fer.

Les chemins de fer parisiens et l'intervention d'Arago

Le premier projet d'envergure démarre en 1835 : c'est le Paris-Saint-Germain, conçu par Lamé et ses trois collègues et financé par plusieurs banquiers, dont James de Rothschild, sous forme de 10 000 actions de 500 francs chacune. Il fixe de façon définitive l'écartement des rails à 1,435 m, et le rayon minimum des courbes est porté à 800 m de façon à permettre une vitesse élevée. Sa concession est suivie un an après de celle de deux lignes de Paris à Versailles : celle de la rive droite de la Seine se détachant à Asnières du Paris-Saint-Germain, et celle de la rive gauche, directe. La construction de deux lignes est l'aboutissement d'un conflit entre deux groupes d'intérêt rivaux. C'est l'occasion de la première intervention importante d'Arago à la Chambre des députés, où l'on débat de ces projets le 13 juin 1836. Arago tente de s'opposer à la ligne de la rive droite⁴⁰. Ses arguments principaux sont qu'il faudrait franchir une distance plus grande de Paris à Versailles, et surtout qu'il faudrait forer un tunnel sous le parc de Saint-Cloud. Il pense que la construction de ce tunnel prendrait beaucoup de temps (80 à 100 mois) en raison de la nécessité d'extraire les déblais d'un seul côté, et surtout qu'il produirait des inconvénients dus à la fumée et au froid :

« J'affirme sans hésiter que dans ce passage subit [du chaud au froid] les personnes sujettes à la transpiration seront incommodées, qu'elles gagneront des fluxions de poitrine, des pleurésies, des catarrhes. [Et puis,] il est possible qu'une machine locomotive éclate ; c'est alors un coup de mitraille ; mais à la distance où sont placés les voyageurs, le danger n'est pas énorme. Il n'en serait pas de même dans un tunnel : là vous auriez à redouter les coups directs et les coups réfléchis : là vous auriez à craindre que la voûte ne s'écroulât sur vos têtes. Je le répète, au surplus, je ne crois pas que le danger soit bien grand ; mais enfin [...] j'ai rempli un devoir en montrant que le long souterrain augmenterait considérablement les fâcheux effets d'une explosion. »

On a beaucoup reproché à Arago cette attitude conservatrice, qui ne fait d'ailleurs que refléter celle d'une grande partie de ses contemporains. Il faut dire à sa décharge que les wagons sont alors ouverts à tous les vents, sauf quelquefois en première classe. Peut-être a-t-il

aussi utilisé des arguments spécieux alors qu'il considérait comme inutile l'établissement de deux lignes de Paris à Versailles, et qu'il craignait peut-être l'établissement d'un monopole puisque la ligne de la rive droite devait être adjugée au groupe de Saint-Germain. Mais les arguments de notre bouillant orateur ne sont pas suffisants pour freiner un mouvement irréversible : les deux lignes seront bel et bien ouvertes, en 1839 pour la rive droite et en 1840 pour la rive gauche.

Le 8 mai 1842 un très grave accident se produit à Meudon, sur la ligne de la rive gauche. Dû à la rupture d'un essieu d'une des deux locomotives, il fait au moins 41 morts dont Dumont d'Urville et sa famille, et plus de soixante blessés graves⁴¹. Mais cela ne suffit pas à arrêter le mouvement. La réaction de Lamartine dans un discours à la Chambre⁴² est caractéristique :

« Il faut payer avec larmes le prix que la providence met à ses dons et à ses faveurs ; il faut payer avec larmes, mais il faut payer aussi avec résignation et courage. Messieurs, sachons-le ! La civilisation est aussi un champ de bataille où beaucoup succombent pour la conquête et l'avancement de tous. Plaignons-les, plaignons-nous et marchons ! »

Ceci n'empêche pas l'Académie de sciences de rechercher « les dispositions les plus propres à diminuer la gravité des accidents sur les chemins de fer. » De nombreuses solutions plus ou moins réalistes sont suggérées, notamment pour les freins qui sont alors extrêmement rudimentaires⁴³. Ému par l'accident, Arago n'est pas en reste : il propose⁴⁴ un frein de secours qui consisterait à déployer sur un wagon spécial deux rideaux produisant un freinage sur l'air, avec une surface effective de 16,5 m². De plus, le train serait dételé automatiquement de la locomotive. Avec deux wagons de ce genre aux deux extrémités du train, Arago calcule qu'à une vitesse de 50 km/h^e ce frein serait plus efficace que les freins à manivelle et sabot des « diligences » (wagons) pour un train de 11 voitures, dont 9 diligences avec chacune un serre-frein. Il serait évidemment bien plus utile et plus simple de renverser la vapeur

^e C'était en gros la vitesse maximale sur les lignes françaises vers 1845 ; en revanche, les trains anglais atteignaient couramment 65 à 70 km/h, et exceptionnellement 100 km/h, grâce à des locomotives à grande vitesse qui n'existaient pas encore en France.

de la locomotive et de serrer le frein de son tender. Arago se gardera par la suite de proposer des idées aussi farfelues. Mais le freinage des trains restera déficient jusqu'à l'adoption du frein Westinghouse vers 1880, un frein très sûr puisqu'il serre tant que l'air comprimé n'est pas envoyé pour l'ouvrir.

Banques ou État ?

Dès 1838, le gouvernement propose un réseau comportant 7 lignes reliant Paris à la frontière belge, au Havre, à Nantes, à la frontière espagnole par Bayonne, à Toulouse par la région centrale du pays, à Marseille par Lyon, et à Strasbourg par Nancy. Il propose en plus des lignes transversales de Marseille à Bordeaux par Toulouse, et de Marseille à Bâle par Lyon et Besançon. Ce réseau d'État aurait une longueur totale de 4 400 km et coûterait 1 milliard de francs. Il y aurait des embranchements pour Dunkerque, Calais, Boulogne, Amiens, Metz, Besançon, Tarbes, Perpignan, qui seraient laissés au privé ainsi que des lignes secondaires. On commencerait par les lignes de Paris à la frontière belge, à Rouen, à Bordeaux par Orléans et Tours, et de Marseille à Avignon, ce qui coûterait 350 millions de francs au plus. Mais ce projet grandiose ne se réalisera pas comme prévu. Un problème majeur est évidemment celui du financement. L'État est-il capable de construire et d'exploiter le réseau principal ? Une commission de la Chambre des députés, qui comprend exceptionnellement 18 membres au lieu de 9 habituellement et dont Arago est le rapporteur, est chargée d'examiner cette question. Le rapport⁴⁵, présenté le 24 avril 1838 et où l'on reconnaît aisément le style d'Arago, répond par la négative. Après avoir rappelé les projets gouvernementaux, il recommande qu'on travaille successivement et non simultanément aux différentes lignes afin de bénéficier des progrès, ce qui est raisonnable en ce temps où rien n'est stabilisé. Puis vient la réponse à la question du financement :

« Suivant nous, Messieurs, il faut abandonner l'exécution des chemins de fer, grands ou petits, à l'esprit d'association, partout où il a produit des compagnies sérieuses, fortement et moralement constituées ; l'action gouvernementale immédiate doit s'exercer dans les seules directions où, l'intérêt national des travaux étant bien constaté, il n'y a cependant pas de soumissionnaires, soit à cause de

l'incertitude des produits, soit même, car nous allons jusque-là, à raison de leur insuffisance reconnue. Jamais une commission honorée de votre confiance n'a pu avoir l'inqualifiable pensée de subordonner judaïquement [sic] au bon vouloir ou au caprice des compagnies de capitalistes, l'exécution de travaux dont le bien-être et la sûreté du pays pourraient dépendre. Autant sur ce point nos convictions sont arrêtées et profondes, autant, d'un autre côté, il nous semble nécessaire de mettre des bornes à l'esprit de monopole qui domine trop évidemment l'administration française. [Et il ajoute :] Personne n'a cru sérieusement que l'État pût se charger lui-même de l'exploitation si compliquée, si minutieuse, d'une longue ligne de chemin de fer. Les chemins une fois construits, il faudrait inévitablement les affermer. »

En résumé, la commission recommande que l'intervention de l'État se limite à ce que les entrepreneurs privés ne peuvent réaliser pour une raison ou une autre. Il faut dire que le gouvernement n'envisage pas d'émettre un emprunt spécial pour la construction des lignes, mais seulement d'utiliser les excédents de recette et la réserve de l'amortissement, ce qui paraît bien insuffisant à la commission. Il faut rappeler aussi les lourds sacrifices qui sont consentis au même moment pour les routes et les canaux. De plus, la rentabilité des chemins de fer est loin d'être assurée et il vaut mieux en laisser le risque aux investisseurs privés. Quoi qu'il en soit, le vote négatif de la Chambre (par 196 voix contre 69) a frappé pour longtemps l'État d'incapacité pour la construction et l'exploitation des chemins de fer.

On est ici au cœur d'un débat qui avait déjà commencé l'année précédente, en 1837, par une violente diatribe de Lamartine à la Chambre contre les positions libérales d'Arago. Mais en 1846 Arago va changer d'opinion. Pierre-Joseph Proudhon en dit⁴⁶:

« En 1842 M. Arago était partisan de l'exécution des chemins de fer par les compagnies, et la majorité en France pensait comme lui. En 1846 il est venu dire qu'il avait changé d'opinion ; et à part les spéculateurs des chemins de fer on peut dire encore que la majorité des citoyens a changé comme M. Arago. [...] En sorte qu'aujourd'hui pas plus qu'auparavant ni le public ni M. Arago malgré leur volte-face ne savent ce qu'il veulent. Quel troupeau ! »

Le débat reprend vivement en 1848 pendant la II^e République, où Garnier-Pagès, le ministre des Finances

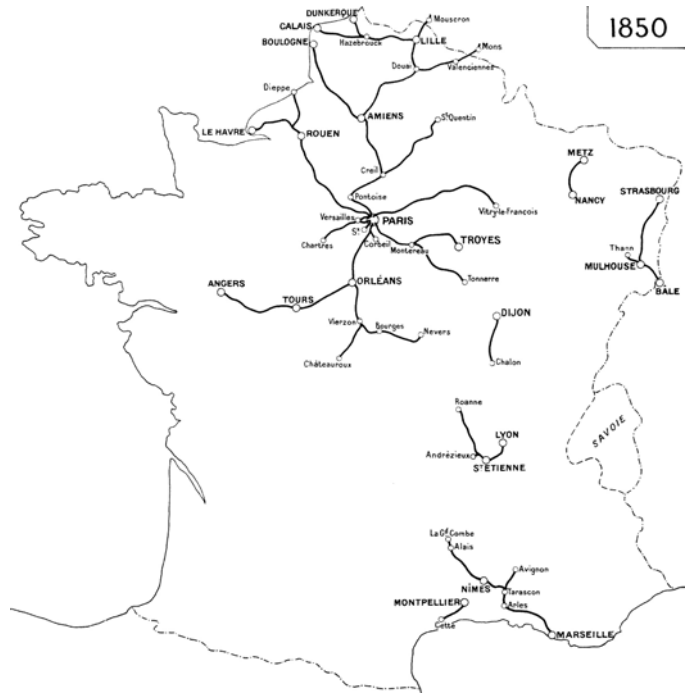
du gouvernement provisoire, propose de nationaliser entièrement les chemins de fer, une proposition vouée d'emblée à l'échec pour des raisons financières. Ce sont donc les grands groupes financiers qui ont gagné, en dépit des obstacles que l'administration tatillonne a mis en travers de leur route et du désir de l'État de garder une mainmise au moins partielle sur les chemins de fer. Une loi de 1842 a bien essayé d'instituer un partage entre l'État, les collectivités locales et les compagnies privées, mais elle s'est révélée inapplicable : finalement l'État et les collectivités se borneront en général à accorder des subventions aux compagnies, l'État se réservant la possibilité de financer seul quelques lignes. Il est hors de notre propos de retracer l'histoire chaotique qui a abouti à la signature entre 1859 et 1863 de conventions entre l'État et six grandes compagnies de chemin de fer. Le débat durera jusqu'à la nationalisation des chemins de fer et la création de la SNCF en 1937, et il pourrait bien reprendre un jour.

La première grande ligne du réseau français est celle de Strasbourg à Bâle, concédée en 1838 à Nicolas Koechlin et terminée en 1841. Puis viennent celle de Paris à Orléans, également concédée en 1838 à un groupe de banquiers entourant Casimir Lecomte et François Bartholony et terminée en 1843, et enfin celle de Paris à Rouen, attribuée en 1840 aux banquiers Charles Laffitte et Edward Blount avec des associés anglais et inaugurée aussi en 1843. Les locomotives de cette dernière ligne, construites à Rouen par les anglais Allcard et Buddicom, sont déjà très perfectionnées (voir les figures sous le titre de ce chapitre). Le Paris-Orléans et le Paris-Rouen sont au bout de quelques années des succès financiers, ce qui encourage les collectivités locales, les investisseurs et leurs actionnaires à construire d'autres lignes : l'argent ne manquera pas. En 1850, donc peu avant la mort d'Arago, le réseau ferré est déjà bien développé (figure 11.13).

Deux fausses pistes: le chemin de fer atmosphérique et le système Arnoux

Dans son rapport de 1838 devant la Chambre, Arago utilise comme argument contre le projet du gouvernement « *la situation encore très imparfaite de l'art, notamment pour la locomotive* ». Il ne faut donc pas s'étonner, en cette période de tâtonnements, que des projets alternatifs aient fleuri.

Figure 11.13. Le réseau ferré français en 1850.



L'un d'eux est le projet de « *chemin de fer atmosphérique* », qui sera poussé très loin avec la bénédiction d'Arago. L'idée, qui vient d'Angleterre, est simple mais d'application difficile : un des wagons du train est solidaire d'un piston circulant dans un tube placé sous la voie ferrée, dans lequel des machines pneumatiques fixes font le vide à l'avant du piston (figure 11.14 et figure 11.15). L'énergie est fournie par des machines à vapeur qui actionnent les pompes à vide (figure 11.16). La grande difficulté est évidemment de rendre le tube étanche, alors qu'il comporte une fente sur toute la longueur pour laisser passer la lame qui relie le wagon au piston moteur : on réalise tant bien que mal l'étanchéité avec une lèvre en cuir ou en toile caoutchoutée qui court tout le long du tube, et que des disques soulèvent au passage de la lame^f.

L'idée de l'utilisation du vide pour produire des forces remonte à Denis Papin⁴⁷, qui l'a mise en pratique dans

^f Un autre système, dû à Onésiphore Pecqueur, utilisait une pression de 4 à 5 atmosphères au lieu du vide, ce qui aggravait les problèmes d'étanchéité ; il ne fut jamais réalisé.

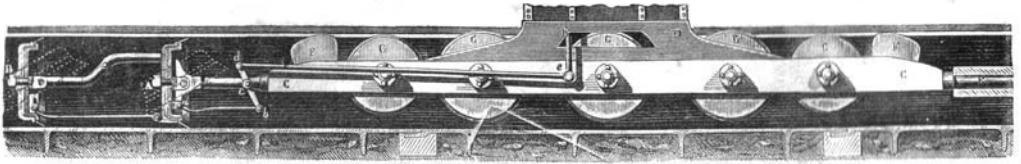


Figure 11.14. L'entraînement du chemin de fer atmosphérique. Le vide est fait à gauche et entraîne les deux pistons, qui tirent l'équipage. Les disques servent à écarter progressivement la lèvre qui réalise l'étanchéité, de manière à laisser passer librement la lame solidaire du wagon. On peut débrayer l'entraînement en faisant pivoter les pistons autour d'un axe horizontal.

sa machine à vapeur atmosphérique, où la pression de l'atmosphère actionne un piston de l'autre côté duquel un vide partiel est créé par condensation de la vapeur d'eau (voir plus haut l'encadré 11.1). Son application au chemin de fer atmosphérique a été imaginée en 1810 par l'anglais Medhurst, de Brighton⁴⁸. Le premier chemin de fer de ce type a été construit en Irlande au début des années 1840 par les anglais Clegg et Samuda, sur une longueur de 2 275 mètres ; il pouvait entraîner un convoi de 30 tonnes à 83 km/h. Il y en eut peu après plusieurs autres

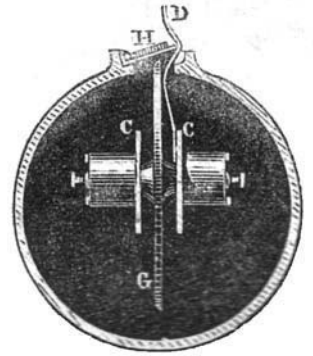


Figure 11.15. Le passage de la lame CD entraînant le wagon sous la lèvre d'étanchéité H du tube du chemin de fer atmosphérique, soulevée par le disque biseauté G.

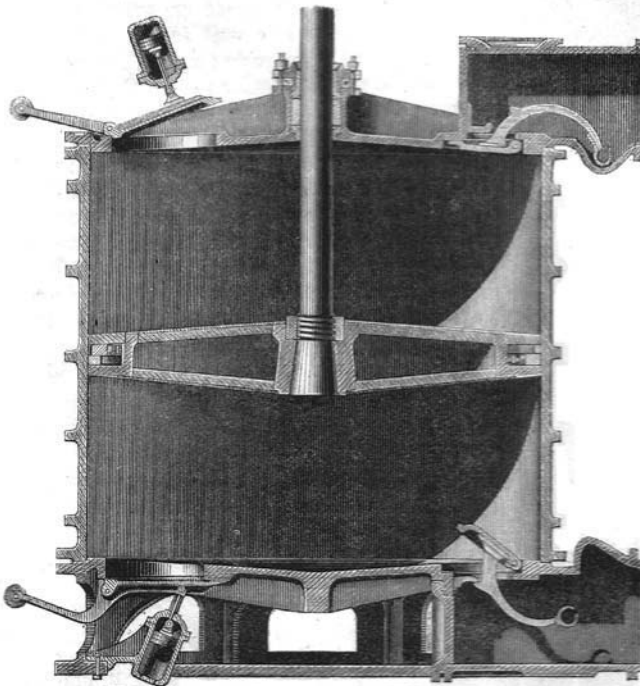


Figure 11.16. Une des quatre pompes qui font le vide dans le tube du chemin de fer atmosphérique. Ces pompes à double effet (le piston aspire aussi bien en montant qu'en descendant) sont mues par des machines à vapeur.

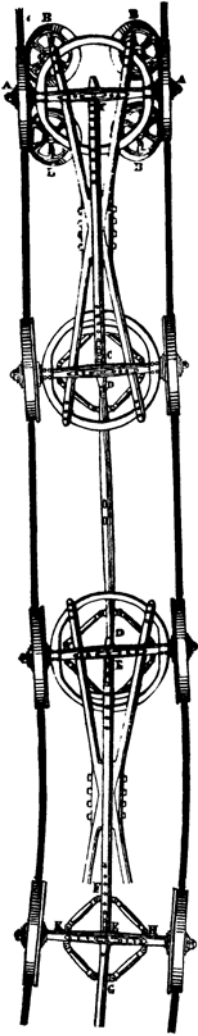


Figure 11.17. Principe du système Arnoux. En tête du train, quatre roues de guidage roulant obliquement sur l'intérieur des rails forcent l'essieu du haut à être perpendiculaire aux rails. Un système de tringles communique cette orientation aux essieux suivants. Un système semblable est placé en queue de train.

en Angleterre. Les ingénieurs français qui les ont visités sont généralement favorables : le *Moniteur industriel* écrit en décembre 1843 que le procédé « apparaît comme incomparablement plus économique et rapide que le système locomotif et parfaitement sûr »⁴⁹. Seuls quelques-uns sont défavorables, faisant remarquer avec raison que le chemin de fer atmosphérique n'a d'utilité que dans le cas de très fortes pentes et sur peu de distance, et que les coûts d'exploitation en seront très élevés. Cependant les constructeurs français se mettent au travail : Hallette, d'Arras, réalise un prototype sur une longueur de 100 mètres. Arago s'enthousiasme, et propose à la Chambre le 16 juillet 1844 d'accorder un crédit de 1 800 000 francs pour essayer les différents systèmes qui sont proposés par ces constructeurs⁵⁰. Trois candidats se manifestent, et finalement le Conseil des Ponts et Chaussées en choisit un autre : la Compagnie du Saint-Germain. Celle-ci y voit le moyen de compléter à bon compte le projet qui lui avait été concédé précédemment : en effet la pente pour arriver à Saint-Germain étant trop forte, le train venant de Paris s'arrête au Pecq, et il faut prendre une voiture à cheval pour terminer le voyage. La compagnie choisit le procédé anglais de Clegg et Samuda, et non celui de Hallette, qui sera acculé à la faillite en 1847 malgré l'intervention d'Arago. C'est Eugène Flachet qui est chargé de la réalisation. Pour transporter le matériel, il construit une locomotive qui se révèle capable de franchir la pente de 35 pour mille entre Le Pecq et Saint-Germain, démontrant ainsi dès le départ l'inutilité du chemin de fer atmosphérique. Mais les crédits sont votés, et on poursuit le projet ! Le chantier s'achève en 1847, pour un coût de 6 millions de francs, bien supérieur aux prévisions initiales. Le chemin de fer atmosphérique fonctionnera tant bien que mal jusqu'en 1858, date à laquelle un accident qui fera trois morts, dû à une rupture de freins à la descente (le train redescendait par gravité), mettra fin à l'exploitation.

Si les locomotives posent des problèmes, il en est de même des wagons. Le problème le plus difficile à résoudre pour les ingénieurs qui sont chargés est celui de l'adaptation des voitures aux courbes de petit rayon. On construit au début des essieux parallèles et rigides dont les roues sont solidaires, ce qui nécessite de faire des voitures très courtes, particulièrement malcommodes. L'ingénieur Jean-Claude Républicain Arnoux invente en 1838 un « système de voitures pour chemins de fer de toute courbure ». Ce système de tringles (figure 11.17) force les essieux, montés sur pivots,

à être perpendiculaires aux rails, ce qui permet effectivement d'aborder des courbes de faible rayon.

Une commission de l'Académie des sciences dont fait partie Arago et dont Jean-Victor Poncelet est le rapporteur examine des essais en modèle réduit : son rapport, favorable, recommande des essais en vraie grandeur⁵¹. Arnoux réalise effectivement ces essais à Saint-Mandé sur une voie de 1 142 m comportant de nombreuses courbes, dont une de 18 m de rayon⁵² ; ils lui ont coûté 150 000 francs. Le duc d'Aumale et des académiciens, dont évidemment Arago, y assistent. Le rapport de la commission prétend que l'invention égale en importance celle de la chaudière tubulaire et du tirage forcé des locomotives ; elle vaut à Arnoux le prix Montyon de l'Académie. En grande partie grâce à l'appui d'Arago, Arnoux obtient en 1844 la concession de la ligne de chemin de fer de Paris à Sceaux, dite « *ligne de Sceaux* », qui est aujourd'hui devenue, après quelques changements de tracé, une partie de la ligne B du RER. Il y applique son système, qui permet notamment au convoi de faire demi-tour sur une voie de 25 m de rayon aux extrémités de la ligne. C'est la raison pour laquelle la gare de Denfert-Rochereau, ancien terminus de la ligne de Sceaux à Paris, a la forme incurvée qu'on lui connaît : le quai longeait la voie de retournement.

Cependant le matériel d'Arnoux ne peut circuler sur les voies normales, car l'écartement des rails est de 1 750 mm au lieu des 1 435 mm habituels, et les roues de guidage ne peuvent franchir les aiguillages. C'est donc une impasse. La ligne de Sceaux est la seule où ce système sera appliqué jusqu'à son remplacement en 1857. Le problème des courbes reste entier. Pourtant on avait inventé depuis longtemps aux États-Unis la « *voiture américaine* », dont la caisse repose sur deux bogies comportant chacun deux essieux, ce qui lui permet de prendre les courbes sans difficulté même si le wagon est très long. Bien qu'essayé sur la ligne de Saint-Étienne à Lyon jusqu'à 1842 puis abandonné, ce type de voiture ne réussira à s'imposer que dans les années 1860. C'est seulement alors que les voyageurs commenceront à trouver un certain confort dans les wagons mis à leur disposition.

L'appui qu'Arago a apporté à ces projets partait certainement d'une bonne intention. Il est dommage qu'il ait par ailleurs préconisé l'attentisme, en recommandant dans son rapport de 1838 de laisser les pays étrangers essayer les plâtres, et de n'adopter de nouvelles techniques

que lorsqu'elles auraient été validées par leur expérience. Les historiens considèrent que ces conseils étaient mauvais, car la seule manière pour la France de rattraper son retard était de se lancer sans hésiter dans la voie des réalisations. Heureusement, les industriels et les banquiers l'ont fait. Si la stratégie d'Arago avait été suivie, notre pays se serait mis pour longtemps sous la dépendance des techniques britanniques.

La navigation

Arago s'est toujours intéressé à la navigation, et il n'est pas étonnant qu'il se soit fait le porte-parole de nouveautés techniques la concernant, cette fois avec plus de bonheur que dans le cas des chemins de fer. Sont reproduites dans le tome 5 des *Œuvres complètes* plusieurs interventions à la Chambre des députés concernant l'amélioration des ports du Havre et de ses accès, de Cherbourg, de Port-Vendres et d'Alger, ainsi qu'une intervention en 1836 sur un procédé nouveau pour tendre les cordages⁵³, et une autre en 1839 sur l'emploi simultané des voiles et de la vapeur pour économiser le charbon⁵⁴. L'époque était en effet celle d'un grand changement : le remplacement progressif de la voile par la vapeur. Retraçons rapidement cette évolution.

Les premiers navires à vapeur

L'idée d'appliquer la vapeur à la navigation est aussi ancienne que la machine à vapeur elle-même : elle est due à Papin, qui a proposé en 1696 un moyen pour transformer le mouvement alternatif d'un piston en un mouvement de rotation de l'arbre entraînant les « rames tournantes », ou aubes latérales. Le premier bateau à vapeur qui ait réellement navigué est celui de Claude-François de Jouffroy d'Abbans, qui en 1781 remonta la Saône à 8 km/h pendant quelque temps. En 1803, un navire à vapeur construit par l'américain Robert Fulton navigue bien sur la Seine mais le gouvernement ne s'y intéresse pas. Fulton repart donc aux États-Unis et y lance en 1807 à New York le *Clermont*, le premier bateau à vapeur auquel on n'ait pas renoncé après l'avoir essayé ; il est employé au transport des voyageurs et des marchandises sur le fleuve Hudson. En 1812, on lance en Angleterre un navire du même genre. Le premier vapeur

français est le *Sphinx*, construit à Rochefort en 1828-1829 avec une machine anglaise de Faucett. Ce bateau et les suivants sont à aubes ; la machine, ou les machines car on en emploie souvent deux actionnant le même arbre tournant de façon à corriger en partie ce qu'il y a d'irrégulier dans la transmission du mouvement par l'intermédiaire d'une manivelle, développent 160 à 220 chevaux⁵⁵.

Le premier navire à traverser l'Atlantique est un voilier américain assisté par une machine à vapeur de 90 chevaux, le *Savannah*, mais la première ligne régulière transatlantique par vapeur, qui apparaît en 1836, est anglaise. Il y aura bientôt une compétition avec les Américains « dont les résultats [sont] merveilleux » : leurs paquebots font jusqu'à 12 nœuds. En France, on essaye simultanément de construire des vapeurs de guerre et des vapeurs transatlantiques ; mais, la ligne transatlantique étant jugée peu rentable, les paquebots transatlantiques seront convertis en transports de troupe, utilisés pour les campagnes en Algérie et pour une expédition vers Rome en 1849. Puis on construit à Toulon à partir de 1848, sur les plans d'Henri Dupuy de Lôme, un bâtiment de guerre mixte (voile et vapeur) de 92 canons, lancé en 1850, le *Président*. Devenu un peu plus tard le *Napoléon*, il a 71 m de long, jauge 5 120 tonneaux et est mû par une machine à vapeur double de Moll de 960 chevaux construite à l'arsenal d'Indret, à l'embouchure de la Loire. Il est propulsé par une hélice et peut atteindre 13,5 nœuds. L'hélice est laissée libre quand il marche à voile⁵⁶.

L'introduction de l'hélice

La presque totalité des premiers bateaux à moteur sont mus par des roues à aubes. Cependant on réalise que ce mode de propulsion ne convient pas bien aux eaux agitées, car le roulis du bateau fait que les deux roues sont inégalement plongées dans l'eau ce qui produit des dérives latérales. On cherche donc d'autres solutions. Par exemple, Achille de Jouffroy d'Abbans, le fils de Claude-François de Jouffroy d'Abbans qui a fait voguer le premier bateau à moteur, fait en 1840 des essais en vraie grandeur d'« aubes articulées, à mouvement alternatif, appliquées à une goélette à vapeur »⁵⁷. Il s'agit de sortes de pattes de cygne situées à l'arrière du bateau, qu'un rapport de l'Académie juge supérieur aux roues à aubes. Cette idée n'aura

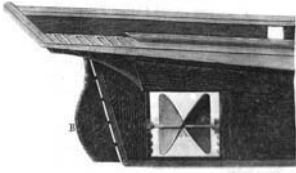


Figure 11.18. L'hélice de Smith.

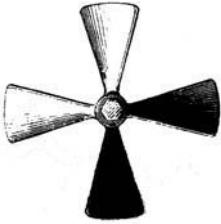


Figure 11.19. L'hélice du Napoléon.

pas de lendemain. L'investisseur ardennais Hélot, qui avait financé le projet sur la recommandation de l'abbé François Napoléon Marie Moigno, célèbre vulgarisateur de la science, voit fondre son capital ; Moigno, qui avait tout garanti sur sa parole, est forcé de se livrer à une cavalerie financière très douteuse pour essayer de le rembourser, ce qui aura pour seul résultat son exclusion de l'ordre des Jésuites⁵⁸. La solution qui va progressivement s'imposer est la propulsion par hélice.

L'hélice n'est pas une nouveauté : Daniel Bernoulli remporte en 1753 un prix de l'Académie des sciences de Paris pour « *des plans inclinés qui, pressant obliquement l'eau, tourneraient autour d'un axe longitudinal et parallèle à la marche du navire* ». On pense aussi à une vis d'Archimède dont Hooke aurait eu le premier l'idée, reprise en 1768 par Paucton dans son *Traité sur la vis d'Archimède*. Les premiers essais d'application sont dus en 1792 à William Littleton à Londres, et en France, en 1803, à Thomas Charles Auguste Dallery, facteur d'instruments et mécanicien, fils du célèbre facteur d'orgues Charles Dallery. Un an plus tard, J. Cox Stevens fait des essais aux États-Unis, donc à la même époque que les essais de bateaux à aubes par Fulton. C'est donc à tort qu'on attribue souvent l'invention de l'hélice à Pierre Louis Frédéric Sauvage. Le projet de Sauvage en 1832 comporte deux longues vis d'Archimède de part et d'autre de la coque et se révèle trop compliqué. Il a d'ailleurs un concurrent en la personne de l'enseigne de vaisseau (plus tard amiral) Bourgois. Le fermier anglais Francis Pettit Smith a plus de titres de gloire car il n'utilise plus qu'une seule spire de la vis d'Archimède, qu'on peut maintenant placer dans l'axe du navire (figure 11.18). Le premier navire à hélice ayant réellement navigué, en 1838, est dénommé *l'Archimède* : c'est un bâtiment anglais de 237 tonneaux muni d'une hélice de Smith, faisant près de 10 nœuds. En France, les premiers essais d'« *hélices hélicoïdes* » sont faits en 1847-1848 par Bourgois et Moll sur le *Pélican*, de 120 chevaux ; mais on parle toujours de roues à aubes puisque le baron Séguier propose à la même époque un système de roues pour un navire mixte, qui seraient rétractables lorsqu'il navigue à voiles⁵⁹. C'est un succès du *Napoléon* en 1850 que d'avoir assuré la suprématie de l'hélice dans notre pays (figure 11.19). De leur côté, les Anglais construisent à Glasgow les premiers paquebots à hélice, en fer, mais on fait à l'économie et leur vitesse n'est que de 8 nœuds.

Cependant la France reste très en retard sur l'Angleterre et les États-Unis en ce qui concerne la navigation à vapeur car, malgré les injonctions d'Arago, on persiste à utiliser des machines à vapeur à basse pression qui consomment énormément de charbon. À la mort d'Arago, la marine marchande américaine à vapeur a un tonnage total de 481 805 tonneaux, contre 187 600 en Angleterre et seulement 13 925 en France. De toute façon, la marine à voile mettra longtemps à disparaître : il y aura encore de beaux jours pour les grands voiliers qui ne consomment pas de charbon du tout, et le tonnage des navires marchands à voile restera longtemps bien supérieur à celui des navires à vapeur : en 1854, il atteindra 3 millions de tonneaux en Angleterre, quinze fois plus que celui des navires marchands à vapeur⁶⁰.

La photographie

La photographie est née pendant la période d'activité d'Arago, et son développement lui doit beaucoup. Ses motivations sont claires : en tant que spécialiste d'optique, il est naturel qu'il soit enthousiasmé par la découverte de Nicéphore Niepce et de Louis Jacques Mandé Daguerre, qu'il cherche à attirer les honneurs officiels sur une invention qu'il juge à juste titre majeure, et qu'il veuille la mettre à la portée du plus grand nombre.

Tout à fait à la fin de sa vie, en 1853, Arago écrit un texte important sur la photographie⁶¹ qui reprend ses textes antérieurs et en résume l'histoire, de façon d'ailleurs quelque peu tendancieuse car il tient à démontrer que la photographie est une invention purement française, due exclusivement à Niepce et à Daguerre⁶². Il nous suffit de le suivre, tout en gardant un œil critique sur ces tendances au nationalisme et en remarquant que l'apport anglais est loin d'être négligeable, tandis que d'autres Français comme Hippolyte Bayard⁶³, qui a été le premier à exposer des photographies, ont joué un rôle important en parallèle avec Daguerre.

Les débuts

On savait depuis longtemps que les sels d'argent étaient sensibles à la lumière, et diverses tentatives avaient été

faites pour fixer des images en les utilisant. Par exemple, Laplace, Malus et Arago lui-même ont essayé vers 1811 d'obtenir une image de la Lune avec du chlorure d'argent, mais sans résultat. En Angleterre, Wedgwood, fils du fondateur de la célèbre fabrique de céramique, et Humphry Davy ont réussi à obtenir quelques images, mais elles disparaissaient rapidement faute de fixation. C'est incontestablement Niepce qui est le premier en 1822 à réaliser une image permanente. Il utilise le bitume de Judée, un produit naturel qui devient peu soluble lorsqu'il est exposé à la lumière, et fixe l'image en dissolvant la partie non exposée dans du pétrole. Il réussit en 1816 la première véritable photographie avec une chambre noire. En appliquant de l'acide sur la plaque, il parvient même vers 1829 à la graver et en permettre la reproduction. D'après Arago, il aurait aussi fait cette année-là des négatifs à partir desquels on pouvait tirer des positifs par contact.

Cette même année, Daguerre, un peintre de « *panoramas* » très populaires à l'époque, familier des chambres noires qu'il utilise pour son travail, s'associe à Niepce pour faire des expériences, d'abord avec le bitume de Judée puis avec l'iodure d'argent, un produit photosensible obtenu en plaçant une plaque d'argent dans la vapeur d'iode. Mais Niepce meurt en 1833 et Daguerre continue seul. Le temps d'exposition pour obtenir une image visible sur la plaque est de plusieurs heures, mais Daguerre découvre par hasard qu'une plaque peu exposée, sur laquelle on ne voit rien, peut être révélée (on dirait aujourd'hui développée) par la vapeur de mercure : le temps d'exposition peut alors être réduit à moins d'une demi-heure. Et puis, Daguerre découvre le moyen de fixer l'image sur la plaque en lavant l'excès d'iodure d'argent avec de l'eau salée. Le daguerréotype est né.

Les présentations d'Arago devant l'Académie

Le 7 janvier 1839, Arago présente à l'Académie des sciences l'invention de Daguerre. Il est intéressant de reproduire une partie du compte rendu de la séance où est faite cette présentation⁶⁴ :

« M. Arago prend la parole pour donner verbalement à l'Académie une idée générale de la belle découverte que M. Daguerre a faite, et sur laquelle la majeure partie du public n'a eu jusqu'ici que des notions erronées. [...] »

« Les principaux produits de ses nouveaux procédés que M. Daguerre a mis sous les yeux de trois membres de l'Académie, MM. De Humboldt, Biot et Arago, sont une vue de la grande galerie qui joint le Louvre aux Tuileries ; une vue de la Cité et des tours de Notre-Dame ; des vues de la Seine et de plusieurs de ses ponts, des vues de quelques-unes des barrières de la capitale. [...] En été et en plein midi, huit à dix minutes suffisent. [...]

« M. Arago a essayé de faire ressortir tout ce que l'invention de M. Daguerre offrira de ressources aux voyageurs, tout ce qu'en pourront tirer aujourd'hui, surtout, les sociétés savantes et les simples particuliers qui s'occupent avec tant de zèle de la représentation graphique des monuments du royaume. La facilité et l'exactitude qui résulteront de ces nouveaux procédés, loin de nuire à la classe si intéressante des dessinateurs, leur procurera un surcroît d'occupation. Ils travailleront certainement moins en plein air, mais beaucoup plus dans leurs ateliers.

« Le nouveau réactif semble aussi devoir fournir aux physiciens et aux astronomes des moyens d'investigation très précieux. À la demande des académiciens déjà cités, M. Daguerre a jeté l'image de la Lune, formée au foyer d'une médiocre lentille, sur un de ses écrans, et elle y a laissé une empreinte blanche évidente. [...]

« L'invention de M. Daguerre est le fruit d'un travail assidu de plusieurs années, pendant lesquelles il a eu comme collaborateur son ami, feu M. Niepce, de Châlons-sur-Saône. En cherchant comment il pourrait être dédommagé de ses peines et de ses dépenses, ce peintre distingué n'a pas tardé à reconnaître qu'un brevet d'invention ne le conduirait pas au but : il semble donc indispensable que le Gouvernement dédommage directement M. Daguerre et que la France, ensuite, dote noblement le monde entier d'une découverte qui peut tant contribuer aux progrès des arts et des sciences. M. Arago annonce qu'il adressera à ce sujet une demande au Ministère ou aux Chambres, dès que M. Daguerre, qui a proposé de l'initier à tous les détails de sa méthode, lui aura prouvé qu'aux admirables propriétés dont les résultats obtenus sont une manifestation si éclatante, cette méthode joint, comme l'annonce l'inventeur, le mérite d'être économique, d'être facile, de pouvoir être employée en tous lieux par les voyageurs. »

Dès la veille, un long article consacré à la découverte de Daguerre était paru dans la *Gazette de France* sous la plume du journaliste Henri Gaucheraud. Il était sans doute basé

sur les notes qu'Arago lui avait communiquées. Cet article est peu précis, mais c'est là que l'on lit pour la première fois un compte rendu sur l'image photographique, que Gaucheraud baptise *daguerotype*. Cependant, le 4 février suivant, Arago doit lire une réclamation de priorité issue de l'anglais William Henry Fox Talbot. Bien entendu, il monte au créneau pour défendre Daguerre. En réalité, les deux inventeurs ont travaillé indépendamment, au moins au début, et il est sans grand intérêt aujourd'hui de discuter de leur priorité respective, bien que les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* de 1839 et 1840 soient remplis de cette controverse⁶⁵. Il apparaît cependant que Talbot ne découvre l'image latente et son développement qu'en 1840 (procédé dit *calotype*), donc clairement après Daguerre qui l'a fait en 1835. Arago ne désarme pas, et se fait un malin plaisir de montrer aux Anglais les magnifiques photographies de Daguerre :

« J'ai profité en 1839 du séjour à Paris de plusieurs savants anglais pour leur faire voir divers tableaux que M. Daguerre a exécutés d'après ses procédés photographiques. [...] M. [John] Herschel en particulier, lui qui, de l'autre côté du détroit, s'était occupé avec succès du perfectionnement des procédés recommandés par M. Talbot, s'est exprimé, sur les travaux de notre compatriote, dans les termes d'une admiration sincère. A mesure que les tableaux de M. Daguerre venaient se placer sur le chevalet, les mots : c'est un miracle, sortaient de la bouche de l'illustre astronome. »

Arago dépose le 3 juillet 1839 devant la Chambre des députés un rapport sur l'invention, et la Chambre vote le 9 juillet la pension promise à Daguerre, qui se monte à 6 000 francs annuels, tandis que les héritiers de Niepce reçoivent 4 000 francs par an. Tous les détails du procédé de Daguerre sont finalement divulgués le 19 août, lors d'une séance conjointe de l'Académie des sciences et de l'Académie des beaux-arts. L'affluence est grande ; Daguerre, qui aurait dû faire lui-même la présentation, est si troublé que c'est finalement Arago qui parle (voir la figure sous le titre du chapitre 1). Il en profite pour citer dans son rapport⁶⁶ une note écrite « à sa prière » par le peintre Paul Delaroche, alors au faîte de sa célébrité :

« Le peintre trouvera dans ce procédé un moyen prompt de faire des collections d'études qu'il ne pourrait obtenir autrement qu'avec beaucoup de temps, de peine, et de manière moins parfaite, quel que fût d'ailleurs son talent. [...] »

En résumé, l'admirable découverte de M. Daguerre est un immense service rendu aux arts. »

D'une façon qui peut nous paraître un peu surprenante, les réactions de la part des peintres, des graveurs et de leurs porte-parole seront peu hostiles à l'invention, et les mots que l'on a tardivement attribués à Delaroche : « *La peinture est morte à dater de ce jour !* » n'ont jamais été prononcés.

Les perfectionnements

Les mois suivants, beaucoup de savants, d'ingénieurs et d'amateurs s'activent à faire des daguerréotypes dans le monde entier. Daguerre en profite pour commercialiser le matériel nécessaire, tandis que l'opticien Charles Chevalier fabrique les objectifs des chambres noires. Les perfectionnements sont rapides : on peut citer la substitution chimique de l'or à l'argent dans les daguerréotypes après leur développement, une invention de Fizeau qui améliore leur aspect et leur solidité ; l'obtention par différents chercheurs de gravures reproductibles, notamment par Niepce de Saint-Victor, un cousin de Nicéphore Niepce, qui réalise les meilleures sur acier en 1853 ; l'invention du négatif à l'albumine sur verre par le même en 1847 ; celle du négatif au collodion par G. Le Gray et les anglais F. Archer et Bingham en 1850-1852, etc. Les premiers agrandissements sont réalisés en 1852-1853 par Heilmann, et par Lerebours fils et Salleron, qui utilisent un grand héliostat pour éclairer le négatif sur verre. On regrette que la photographie ne puisse pas reproduire les couleurs, problème dont s'était déjà préoccupé Daguerre qui avait fait des essais sans suite avec des poudres phosphorescentes colorées (sulfate de baryum). Le daguerréotype est supplanté vers 1850 par la photographie que nous connaissons (négatif sur verre et tirage positif sur papier), bien moins onéreuse et plus facile à réaliser. Arago peut affirmer avec satisfaction dans son texte de 1853 :

« Grâce à tant d'efforts couronnés de succès, la photographie a atteint, en peu d'années, une perfection inattendue ; cet art s'est répandu dans toutes les parties du monde avec une rapidité que je n'aurais pas osé espérer à une époque où il prenait naissance et où, selon certaines personnes, je lui prédisais pendant un trop brillant avenir. »

Les premières photographies astronomiques⁶⁷

Arago étant astronome, il est naturel qu'il ait très tôt pensé à photographier le ciel. C'est d'ailleurs une des quelques applications qu'il prévoit dans ses présentations de 1839 : il envisage la possibilité de cartographier la Lune, et aussi de renouveler la photométrie par la photographie, qu'il juge meilleure que l'œil pour comparer l'éclat de deux astres. On pourrait aussi faire le spectre du Soleil dans la région de l'ultraviolet, celle des « rayons obscurs » où l'œil est insensible mais qui impressionnent la plaque photographique (ce spectre sera obtenu en 1842 par Edmond Becquerel⁶⁸). Et puis, rien n'empêche de rêver au futur comme il le fait dans son rapport du 19 août 1839 :

« Quand des observateurs appliquent un nouvel instrument à l'étude de la nature, ce qu'ils en ont espéré est toujours peu de chose relativement à la succession de découvertes dont l'instrument devient l'origine. En ce genre, c'est sur l'imprévu qu'on doit particulièrement compter. »

Arago donne alors des exemples de découvertes fortuites liées à la mise en service de nouveaux moyens d'observation : découverte des anneaux de Saturne, de la vitesse finie de la lumière par l'observation des satellites de Jupiter, etc.

Cependant, les choses ne sont pas allées vite. La photographie de la Lune obtenue par Daguerre en 1838 étant très médiocre, la première photographie astronomique réussie est sans doute un daguerréotype du Soleil pris par Daguerre et Arago lui-même lors d'une éclipse partielle de Soleil, très probablement celle du 15 mars 1839. Ce daguerréotype est signalé à l'Observatoire de Paris par l'amiral Mouchez, son directeur⁶⁹, et il en existe une reproduction⁷⁰ datant d'environ 1893 (figure 11.20) ; mais il n'a pas été retrouvé. Arago signale que « dès les premiers temps de la publication de la brillante découverte de M. Daguerre, [il a] reconnu, en recevant l'image du Soleil sur une plaque d'argent, que les rayons qui proviennent de la partie centrale du disque du Soleil ont une plus forte action photogénique que ceux qui partent des bords »⁷¹. S'agit-il du daguerréotype de l'éclipse, ou d'un autre ?

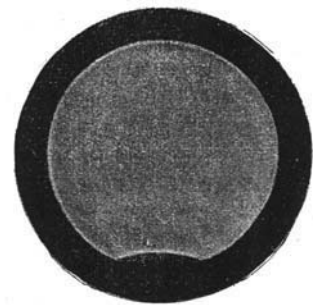


Figure 11.20. Reproduction de la première photographie du Soleil par Daguerre et Arago, très probablement prise lors de l'éclipse partielle du 15 mars 1839.

Un astronome autrichien, Alessandro Majocchi, obtient un daguerréotype de l'éclipse totale de Soleil du 8 juillet 1842 pendant la phase partielle. Lerebours fils réalise en 1842 un autre daguerréotype du Soleil, mais il

est sans doute surexposé. Ce n'est pas le cas des remarquables photographies prises de 1843 à 1845 par Fizeau et Foucault (figure 11.20), qui utilisent un obturateur à rideau rudimentaire : elles montrent clairement les taches du Soleil et surtout l'assombrissement du bord du disque, comme le signalent les auteurs dès 1844⁷². Il est curieux que Fizeau et Foucault n'aient pas présenté leurs photographies à l'Académie des sciences ; mais le sujet était en quelque sorte la propriété d'Arago. En 1850, Niepce de Saint-Victor annonce avoir obtenu des clichés à l'albumine du Soleil où il voit bien l'assombrissement des bords « conforme à l'opinion émise par M. Arago », qui s'est finalement rendu à l'évidence⁷³.

Le premier daguerréotype du Soleil totalement éclipsé a été obtenu le 18 juillet 1851 par August Busch, directeur de l'Observatoire de Königsberg, assisté du photographe Wolfgang Berkowski. On y voit clairement les protubérances et la basse couronne. D'autres photographies, cette fois au collodion humide sur verre, ont été prises par Warren de la Rue, le père Angelo Secchi et Léon Foucault⁸ lors de l'éclipse totale du 18 juillet 1860 en Espagne⁷⁴. Par ailleurs, on a commencé dès 1858 à l'Observatoire de Kew, en Angleterre, un programme de photographie systématique du Soleil pour étudier les taches et les facules. Les plus belles photographies anciennes du Soleil, qui montrent tous les détails de sa surface, seront prises par Jules Janssen à l'Observatoire de Meudon entre 1876 et 1903.

Photographier la Lune est plus facile que le Soleil non éclipsé, car les temps de pose sont plus longs et il n'y a pas besoin d'obturateur rapide. Mais il faut utiliser une lunette équatoriale qui suit le mouvement de notre satellite dans le ciel. Dès 1840, le chimiste américain John William Draper, père de l'astronome Henry Draper, obtient en vingt minutes un daguerréotype convenable de la Lune. Malgré les injonctions d'Arago, rien de tel ne semble avoir été fait en France dans les années 1840. D'autres images, de qualité bien supérieure, sont prises en 1850 avec la grande lunette équatoriale de 38 cm d'Harvard College, à Cambridge (Massachusetts) par William Cranch Bond

⁸ L'Amiral Mouchez signale en 1886 au Bureau des longitudes qu'il y a à l'Observatoire trois épreuves d'une éclipse de Soleil données par Lucie Laugier, dont Fizeau dit qu'elles peuvent être de Foucault. Elles sont peut-être celles prises par Foucault en 1860. Elles n'ont malheureusement pas été retrouvées.

et un photographe de Boston, J.A. Whipple. Outre ses photographies à l'albumine du Soleil, Niepce de Saint-Victor obtient en 1850 des photographies de la Lune. Elles inaugurent une nouvelle ère où s'illustreront J. Phillips, Warren de la Rue, Henry Draper, Lewis Morris Rutherford et d'autres, jusqu'aux magnifiques photographies prises à l'Observatoire de Paris, de 1890 à 1905, par les frères Henry et par Maurice Lœwy et Victor Puiseux. Les frères Henry feront aussi de remarquables photographies de planètes.

Quant aux étoiles, il faudra attendre 1857 pour que George Phillips Bond, qui avait succédé à son père à la direction de l'Observatoire d'Harvard, obtienne avec les photographes Whipple et Black les premières photographies de qualité, dont certaines atteignent la magnitude 6, c'est-à-dire la limite de la vision à l'œil nu. Trente ans plus tard, les frères Henry atteindront la magnitude 10 avec une lunette plus petite que celle d'Harvard. La première photographie d'une comète, la comète Donati, sera réalisée par Usherwood. Celle d'une nébuleuse, la Nébuleuse d'Orion, ne sera obtenue qu'en 1880 par Henry Draper. Le premier spectre d'une étoile sera photographié par Henry Draper en 1872, et Sir William Huggins obtiendra entre 1876 et 1886 le spectre de toutes les étoiles brillantes et de différents autres astres.

D'autres applications astronomiques de la photographie ont été envisagées par divers chercheurs, dont en France Hervé Faye qui a proposé de l'utiliser pour enregistrer le passage du Soleil et des étoiles au méridien, évitant ainsi les erreurs d'appréciation de l'observateur visuel. L'idée ne sera appliquée qu'à partir de 1858 par Porro et Quinet pour le passage du Soleil, et n'aura guère d'avenir. Il nous faut aussi mentionner l'observation photographique des passages de Vénus devant le Soleil en 1874 et 1882, à l'occasion desquels Jules Janssen inventera son célèbre revolver photographique, qui permettra de prendre des photographies successives sur une plaque annulaire et sera un des ancêtres du cinématographe.

Chaux, mortiers et ciments hydrauliques

Un des nombreux sujets auxquels Arago s'intéresse est celui des ciments, chaux et mortiers hydrauliques.

Il a beaucoup d'admiration pour un ingénieur, Louis-Joseph Vicat (figure 11.21), qui a le même âge que lui et qu'il a pu connaître à l'École polytechnique où il était entré en 1804. Devenu ingénieur des Ponts et Chaussées, Vicat est chargé de la construction du pont de Souillac (figure 11.22) qu'il réalise entre 1812 et 1824. Au cours des travaux, il étudie comment les chaux ou ciments naturels, obtenus en calcinant du calcaire contenant différents composés mineurs, prennent dans l'eau et résistent à la dissolution : c'est évidemment d'une grande importance pour réaliser des ouvrages placés sous l'eau comme les piles des ponts ou les barrages sur les canaux. Cependant, les produits naturels qui conviennent à cet usage ne sont pas fréquents et doivent souvent être apportés de carrières très éloignées. Vicat réalise qu'on peut les remplacer avantageusement par des produits artificiels, réalisés en calcinant du calcaire avec éventuellement de l'argile, auxquels on a ajouté dans des proportions appropriées des adjuvants comme l'alumine, le laitier de haut-fourneau, etc. La fabrication industrielle de la chaux hydraulique artificielle ainsi obtenue commence en 1817, et s'étend aux pouzzolanes et en 1840 aux ciments Portland, qui ont une énorme importance pour la construction. Le fils de Vicat, Joseph, fonde en 1853 la Société Vicat pour les exploiter ; elle existe encore aujourd'hui.

Homme modeste et désintéressé, Vicat ne prend pas de brevet et divulgue largement ses procédés, ainsi que la liste des carrières où l'on peut trouver les composants de ses chaux, mortiers, ciments et pouzzolanes naturels ou artificiels. Il semble qu'il n'ait pas eu toute la reconnaissance qui aurait dû lui revenir, car Honoré de Balzac écrit en 1839 dans *Le curé de village* : « *Quelle sera la récompense de Vicat, celui d'entre nous qui a fait faire le seul progrès réel à la science des constructions ?* »

Fort de sa réussite avec Daguerre, Arago va s'employer à faire obtenir une pension à Vicat. Une commission de la Chambre des députés examine ses travaux, et Arago rapporte au nom de cette commission, le 26 mai 1845 sur un « *projet de loi tendant à accorder, à titre de récompense nationale, une pension annuelle et viagère de 6 000 francs à M. Vicat, ingénieur en chef, directeur des Ponts et Chaussées.* » Son long rapport⁷⁵ est une petite encyclopédie sur les chaux et les ciments, très bien documentée, avec comme d'habitude un historique assez développé. Arago s'excuse ainsi de la longueur du texte :

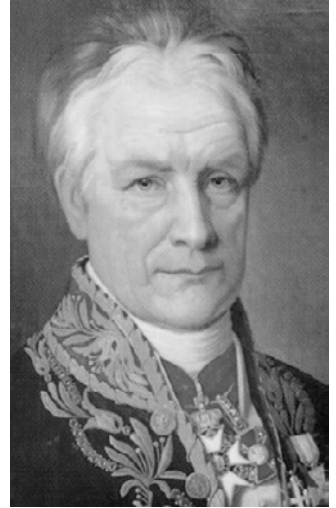


Figure 11.21. Louis-Joseph Vicat (1786-1861).



Figure 11.22. Le pont de Souillac, réalisé par Vicat.

« Nous devons examiner si M. Vicat s'est placé parmi les hommes privilégiés dont la postérité se souviendra ; si ses travaux, au moment de leur publication, avaient un caractère de nouveauté incontestable ; s'ils offraient un intérêt général ; si, enfin, les procédés qui en découlent, doivent prendre rang parmi les inventions brillantes dont notre pays s'honore à juste titre.

Ce court préambule justifiera les développements que vous allez entendre. Nous avons cru d'ailleurs qu'en soumettant à l'analyse la plus stricte, la plus minutieuse, un mérite aussi reconnu que celui de M. Vicat, nous inspirerions une inquiétude salutaire aux médiocrités qui prétendaient faire retentir leur nom dans cette enceinte. Si la commission avait atteint ce but, elle aurait, sans aucun doute, satisfait d'avance à un des vœux de la chambre. »

Le projet de loi est adopté le 16 juin. Heureux temps où la Chambre peut consacrer de longues minutes à s'instruire à propos d'un projet dont les implications financières sont négligeables (la pension annuelle de Vicat représente moins de 20 000 de nos euros). Le plus remarquable dans cette affaire est le sérieux de la commission, où Arago a dû faire le gros du travail car on reconnaît bien son style. Où diable a-t-il trouvé le temps nécessaire, au milieu de ses innombrables activités ?

Projets et réalisations à Paris et ailleurs

À partir de 1830, date à laquelle il est élu au Conseil général de la Seine, qui est en même temps le Conseil municipal de Paris, Arago va s'occuper de divers problèmes qui concernent la capitale : la construction, l'amélioration et l'acquisition de bâtiments publics, les fortifications, l'alimentation en eau et la navigation sur la Seine. Il fera partie de nombreuses commissions auprès de la Chambre des députés dont il sera souvent le rapporteur, dans le but d'obtenir des subventions pour résoudre ces problèmes. D'autres commissions concernent la province. Nous allons examiner quelques-unes de ces interventions.

Les bâtiments publics⁷⁶

En 1831, on termine la construction du bâtiment de la Chambre des députés, mais un important supplément

de crédits se révèle nécessaire. Comme le marché est déjà conclu, la commission, dont fait partie Arago, ne peut que remarquer que le montant en est trop élevé. On voit ici la constante préoccupation d'Arago d'économiser les deniers publics. Même chose en 1836 à propos de la construction du Muséum d'histoire naturelle, où la commission constate toutes sortes d'erreurs et de dépassements, et aussi du nouveau bâtiment du Collège de France, qui comporte un petit observatoire. Arago, qui préside cette fois la commission, est féroce :

« J'ai cherché quelle pouvait être la cause finale de l'observatoire du Collège de France, et je l'ai découverte ; il servira à montrer comment les observatoires ne doivent pas être construits. »

Le crédit demandé pour cet observatoire est refusé et Arago suggère de l'affecter à la construction du bâtiment *« de façon solide et sur un terrain plus convenable »*. Bien entendu, ceci suscite par journaux interposés une controverse avec l'architecte, Paul-Marie Letarouilly, qui restera malgré tout l'architecte du Collège de France jusqu'à sa mort en 1855.

Trois ans auparavant, on avait repris un projet de Napoléon I^{er} consistant à déplacer la Grande Bibliothèque de Paris (la Bibliothèque nationale) de la rue de Richelieu *« dans une galerie transversale qui serait établie dans la cour du Carrousel »*. Arago s'insurge contre le projet qu'il juge inutile et qui sera d'ailleurs abandonné ; il en profite pour lancer une pique contre Napoléon dont il conteste les compétences en matière de bibliothèques :

« Il n'y a pas de capacité universelle. Je me rappelle à ce sujet qu'ayant un jour montré à l'Empereur une tache sur le soleil, j'eus de la peine à lui faire comprendre que cette tache n'était pas dans la lunette. On peut être le plus grand homme des temps modernes, et être fort ignorant sur certains objets. »

Autre désir d'économie dans un discours de 1844 sur la construction d'une nouvelle prison destinée à 1 200 prévenus (sans doute celle de la Santé, terminée en 1867) : Arago trouve que le projet de construction est trop cher, que la ventilation prévue dans le projet initial est suffisante et qu'il ne faut pas en rajouter comme le propose un député. C'est tout de même fermer les yeux sur des conditions d'incarcération qui ne doivent pas être bien reluisantes.

Toutefois Arago soutient des projets nouveaux, surtout dans le domaine scientifique et culturel. C'est ainsi qu'il lit devant la Chambre le 17 juin 1843 un long rapport « *au nom de la Commission chargée de l'examen du projet de loi relatif à un crédit extraordinaire de 590 000 francs pour l'acquisition de l'hôtel de Cluny et de la collection de feu Dusommerard* », où l'on reconnaît aisément son style : c'est l'origine du Musée du Moyen-Âge à Paris. On s'étonne de voir figurer Arago dans la commission à côté d'historiens, de conservateurs de musée, d'artistes et de juristes ; mais c'était une bonne idée de le choisir comme rapporteur, car il fera aboutir le projet grâce à son éloquence.

Il est moins surprenant de le voir s'intéresser au Conservatoire des arts et métiers, dont il soutient en 1844 le projet d'agrandissement de Vaudoyer, en tant que rapporteur d'une commission de la Chambre. Son rapport contient une histoire critique des Écoles des arts et métiers qui en dépendent. Ces écoles sont une idée du duc François de Larochehoucault-Liancourt, qui crée la première en 1780 dans son château de Liancourt, dans l'Oise. Disparue à la Révolution, elle réapparaît à Compiègne en 1803 pour être transférée à Châlons-sur-Marne en 1806. Une seconde école est établie à Angers en 1815. Ces écoles ne fonctionnent pas très bien, mais personne n'ose les critiquer car le duc est toujours là ! En 1828, le duc étant décédé, le conseil de perfectionnement du Conservatoire, où siège Arago, décide enfin de s'occuper de la question. Arago visite l'école de Châlons, et constate que les moyens techniques sont très insuffisants. Il n'y a même pas de machines ! Il découvre d'ailleurs que les élèves n'ont pas en général l'intention de faire carrière dans l'industrie, si bien que l'école n'atteint pas son but. Il visite aussi l'école d'Angers et y trouve les mêmes déficiences. Cependant l'instruction théorique est de bonne qualité. Après avoir consulté Gambey et d'autres ingénieurs, Arago recommande de réformer en profondeur ces écoles, qui doivent être gratuites et donner un meilleur enseignement pratique tout en conservant la qualité des cours théoriques. Mais, pour l'instant, l'allocation prévue ne peut que financer la reconstruction de l'atelier de Châlons, qui est en ruine : le reste viendra plus tard. Les écoles vont se développer très progressivement : d'autres seront créées à Aix-en-Provence en 1843, à Cluny en 1891, à Lille en 1900 et à Paris en 1912. Elles sont aujourd'hui

regroupées au sein de l'École nationale supérieure des arts et métiers (ENSAM), qui a également depuis 1964 une antenne à Bordeaux.

Les fortifications de Paris

Les années 1830 voient un débat animé concernant le projet de fortifications de Paris⁷⁷. La stratégie de l'époque préconise, pour occuper un pays, d'en prendre d'abord la capitale, ce qui est censé affaiblir suffisamment l'ennemi pour entraîner sa capitulation : c'est ce qui s'est passé deux fois de suite en 1815, où Paris a été envahi avant et après les Cent-Jours. Devant de nouvelles menaces, on envisage de construire des fortifications. On s'accorde sur la construction d'une enceinte ; mais faut-il en plus disposer des ouvrages avancés (aussi nommés *forts détachés*) sur les collines les plus proches de Paris ? Arago s'oppose farouchement à ces ouvrages, dont il estime qu'ils seront plus nuisibles qu'utiles en cas d'attaque car si ils sont pris par l'ennemi, celui-ci sera bien placé pour bombarder Paris. Il va ferrailler de 1831 à 1840 pour faire admettre ses idées, alors même que le général Simon Bernard commence cette dernière année, sous l'impulsion de Thiers, à construire des forts autour de Paris. Ces ouvrages sont distants de 1,5 à 5 kilomètres de l'enceinte de la capitale. Alors que tout est joué, Arago intervient pour la dernière fois à la Chambre le 29 janvier 1841 pour un baroud d'honneur, et fait publier des lettres dans plusieurs quotidiens : *le National*, *le Constitutionnel*, *le Courrier français*, et *le Temps*. Il assure que « ce fut, très explicitement, à l'auteur de diverses lettres contre les forts détachés, que les électeurs du 6^e arrondissement de la capitale entendirent confier l'honneur de les représenter à la Chambre des députés et au conseil général de la Seine ».

On construit donc de 1840 à 1844 le rempart avec son fossé long de 34 kilomètres, les fameuses fortifications ou « *fortifs* » entourées d'une zone *non aedificandi* de 250 m de large, et, malgré Arago, les ouvrages avancés. La plupart de ces ouvrages subsistent aujourd'hui, mais ils sont bien entendu désaffectés. Quant aux fortifications, détruites à partir de 1919, elles sont remplacées par les boulevards des maréchaux, tandis que la zone extérieure est occupée par le boulevard périphérique, la cité universitaire et par divers ensembles d'immeubles, stades et espaces verts.

On peut s'étonner — et les contemporains n'y manquent pas — de voir Arago exprimer une opinion aussi résolue sur ce problème. Il se défend avec humour dans un texte où il reprend, à la fin de sa vie (1851 ?), tout ce qu'il a écrit sur les fortifications, en y ajoutant un avant-propos et des commentaires⁷⁸ :

« J'entends déjà retentir à mes oreilles cette légitime demande : « Vos titres, pour exécuter un semblable travail, quels étaient-ils ? » Je l'avouerai, mes titres étaient bien modestes. Appelé pendant quinze années consécutives à examiner, sur la balistique, les officiers d'artillerie et du génie à leur sortie de l'École de Metz, j'ai dû faire de cette branche de la science militaire une étude approfondie. Quant au mode de fortification qui pourrait le plus sûrement préserver la capitale de la France des attaques de l'Europe coalisée, j'ai appris à le connaître, à l'apprécier pendant de très-longes entretiens que j'ai eus à ce sujet, avec mes amis les généraux du génie Valazé [Eléonor Valazé, chargé en 1830 des travaux de défense de Paris, démissionnaire en 1832], Trussart, et surtout avec le général Haxo [François-Nicolas-Benoît Haxo, inspecteur général des fortifications, qualifié par Larousse de « Vauban du XIX^e siècle »]. »

Arago se réfère également à Vauban, qui avait préconisé dans son *Mémoire sur les fortifications de Paris* de 1690 une double enceinte avec seulement deux citadelles élevées permettant d'observer l'ennemi de loin. Il s'attaque une fois de plus à Lamartine, qui est partisan des forts détachés et que la notoriété de Vauban gêne : pour en diminuer l'impact, Lamartine fait imprimer que le mémoire de Vauban « était l'enfance, la seconde enfance, d'un homme de génie ». Arago a beau jeu de montrer que Vauban jouissait en 1690 de toutes ses facultés intellectuelles.

Arago avait raison de s'insurger contre les forts détachés. Le siège de Paris en 1870 montrera que ceux qui ont été construits en 1840-1844 étaient trop près de la capitale, mais aussi que des fortifications moins proches n'auraient pas résisté non plus. En effet, les Prussiens placés sur les hauteurs avoisinantes disposeront pour pilonner la capitale de canons tirant à plus de huit kilomètres, qui lanceront plus de 30 000 obus, dont beaucoup sur les forts. Ceci amènera à construire, à partir de 1874, de nouveaux forts situés de 8 à 17 kilomètres de l'enceinte de la ville, donc bien plus éloignés que ceux des années 1840. Ils ne serviront heureusement jamais à rien.

L'alimentation de Paris en eau et la navigation sur la Seine

Comme pour toutes les grandes villes, l'alimentation de Paris en eau a posé de tous temps des problèmes récurrents et il est naturel qu'Arago s'y soit intéressé en tant qu'édile. Il propose des améliorations sur deux plans : l'utilisation de l'eau de la Seine et la construction de puits artésiens.

Dans le discours qu'il prononce à la Chambre le 2 mars 1846 à l'occasion d'un projet de loi sur la navigation intérieure de la France⁷⁹, Arago demande la suppression d'un rapide entre le pont Notre-Dame et le pont au change, et aussi la destruction de la pompe Notre-Dame, destinée à élever l'eau de la Seine vers des réservoirs, qui est vétuste et très peu performante. Il suggère de barrer le bras droit de la Seine au niveau du Pont-Neuf et d'y installer une turbine de 4 000 chevaux pour élever l'eau, en remplacement de la pompe Notre-Dame. C'est l'occasion de promouvoir la turbine conçue par son ami Benoît Fourneyron (encadré 11.2 ; figures 11.23 et 11.24), dont le rendement est de près de 90 % d'après Koechlin, qui est présent à la séance (le rendement de la machine de Marly, qui élève l'eau de la Seine plus en aval, n'est que de 2 à 3 % !). Arago propose aussi de noyer les fossés des fortifications en cas d'attaque par l'ennemi : 6 turbines de Fourneyron monteraient l'eau jusqu'à des réservoirs à Belleville, d'où elle redescendrait dans les fossés en cas de danger. En période normale, les turbines serviraient à l'alimentation en eau, à actionner des moulins, etc. Ces projets grandioses n'ont pas eu de suite, mais les turbines de Fourneyron ont trouvé d'autres utilisations.

Encadré 11.2. La turbine de Fourneyron

Le moulin à eau à axe vertical est connu depuis très longtemps, et était encore utilisé dans le sud du Massif central au milieu du ^{xx}e siècle. Dans ce système, un jet d'eau arrive obliquement sur des cuillères en bois horizontales qui font tourner l'axe. Mais le rendement est très faible. La première turbine à bon rendement issue de ce système a, d'après Arago, été inventée en 1824 par Burdin, et perfectionnée par Fourneyron en 1827 ; Arago en a parlé à M. de Rambuteau, préfet de la Seine, qui a été intéressé, et des commissaires

de l'Académie des sciences en ont vu une réalisation à Gisors, dont le rendement était de 60 à 77 % pour une hauteur de chute variant entre 0,30 et 1,77 m. Fourneyron en a aussi construit une pour une chute de 108 m en Forêt Noire, tournant à 2 300 t/min⁸⁰. La figure 11.23 montre une coupe de cette turbine. L'eau du bief amont pénètre dans le cylindre creux BB d'où elle sort vers le bief aval par des ouvertures CC disposées en couronne. Elle actionne alors la roue DD, solidaire de l'arbre vertical FF qui transmet la force à une pompe ou à un moulin. La figure 11.24 est une coupe horizontale à travers la roue, dont on voit les ailettes en D. Les ailettes internes B sont fixes et montées sur le bas du cylindre : elles dirigent le courant d'eau perpendiculairement aux ailettes de la roue à travers les trous CC. Une vanne cylindrique aa actionnée par les tiges bb permet de régler le débit de l'eau, et un levier fait monter ou descendre l'arbre de manière à ce que la roue soit bien en regard des ouvertures CC.

D'après Delaunay⁸¹, le rendement de cette turbine est de 75 à 80 % (le chiffre de 90 % avancé par Koechlin est optimiste). D'autres turbines ont été construites entre 1830 et 1850 par Callon, Fontaine-Baron, Girard et Koechlin lui-même.

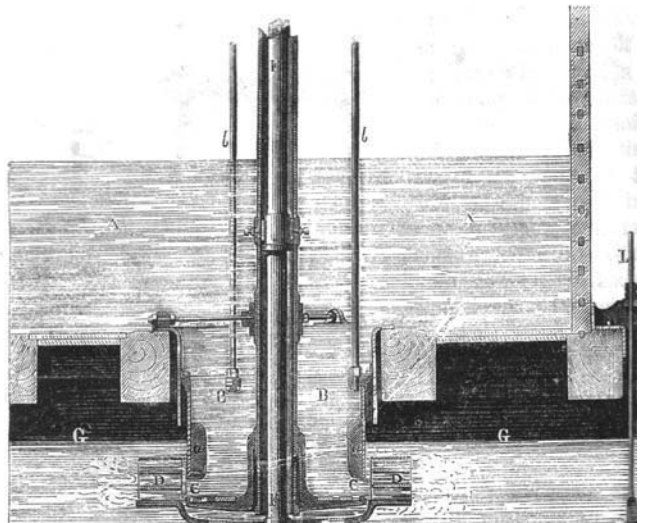


Figure 11.23. La turbine de Fourneyron, coupe. Explications dans le texte de l'encadré 11.2.

Plus raisonnables sont les projets de forage de puits artésiens. Un long texte tardif d'Arago constitue une véritable encyclopédie sur les puits artésiens⁸². Le premier aurait été foré en 1126 à Lillers en Artois, d'où leur nom. Les Chinois les connaissaient également. Dans le Bassin parisien, les couches géologiques forment de gigantesques cuvettes concentriques. L'eau de pluie qui pénètre à la périphérie du bassin peut se trouver emprisonnée entre deux couches imperméables. Il suffit de creuser un puits dans les régions centrales du bassin pour voir surgir cette eau sous l'effet de la pression due à la différence d'altitude entre l'endroit où elle s'infiltré et celui où l'on fore le puits (figure 11.25). L'eau sort pure et potable, car elle a été filtrée pendant son long trajet : c'est un avantage considérable par rapport à l'eau des rivières. Il faut cependant tuber le forage pour éviter qu'il ne se bouche si la matière latérale s'effondre. Pour les premiers puits comme celui de Lillers, ce tubage était en bois de chêne, mais on l'a remplacé avantagusement par des tubes métalliques.

Arago s'est fait avec succès l'ardent promoteur de ces puits à Paris, et aussi dans sa circonscription des Pyrénées-Orientales où plusieurs d'entre eux seront creusés. À Paris, le conseil municipal vote le 28 septembre 1832 une subvention de 18 000 francs, pour forer 3 puits. Après étude, on décide plus raisonnablement le 15 novembre 1833 d'affecter cette somme au creusement d'un seul puits situé aux abattoirs de Grenelle, dont les besoins en eau pure sont considérables. Tout commence très vite : les appareils sont installés le 29 novembre et le forage débute le 30 décembre. Mais les difficultés de l'opération sont très sous-estimées.



Figure 11.24. Ailettes fixes (B) et mobiles (D) de la turbine de Fourneyron. Explications dans le texte de l'encadré 11.2.

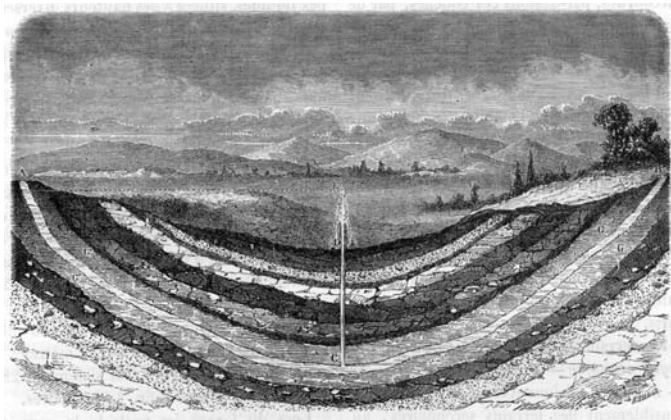


Figure 11.25. Principe du puits artésien.



Figure 11.26. Georges Mulot (1792-1872).

Le marché avec l'entrepreneur Georges Mulot (figure 11.26) prévoit de forer jusqu'à une profondeur de 400 m, pour un montant de 80 000 francs. Au début, la foreuse est actionnée par un manège de cinq ou six hommes. Lorsqu'on arrive à 150 m, les hommes sont remplacés par sept chevaux (figure 11.27). Enfin, le 21 mars 1837, on arrive à 400 m : le marché est terminé, mais il n'y a toujours pas d'eau. Arago obtient une rallonge de 52 000 francs, ce qui devrait permettre d'aller à 500 m, mais sans les frais d'alésage du trou et de tubage provisoire qui se monteront à 53 000 francs. Le nouveau marché est signé le 1^{er} septembre, mais de nombreux et graves incidents se produisent, si bien que le 3 août 1838 on n'en est qu'à 408 m et le 29 avril 1839 à 450 m. À 500 m, toujours pas d'eau. On signe un nouveau marché de 84 000 francs pour aller à 600 m. Le 28 décembre 1840, on est à 537,5 m. Enfin l'eau jaillit le 26 février 1841, d'une profondeur de 548 m. Ce n'est pas encore fini : il faut tuber définitivement le forage pour empêcher l'effondrement des parois. Les tubes en cuivre que l'on utilise pour cela s'écrasent, il faut les retirer et les remplacer par des tubes de fer. Tout est enfin terminé le 30 novembre 1842, après dix ans de travaux. Le puits fournit environ 2 200 litres d'eau à 27,5 °C par minute. La dépense totale aura été de 362 432,65 francs, soit près d'un million d'euros, 20 fois la subvention initiale !

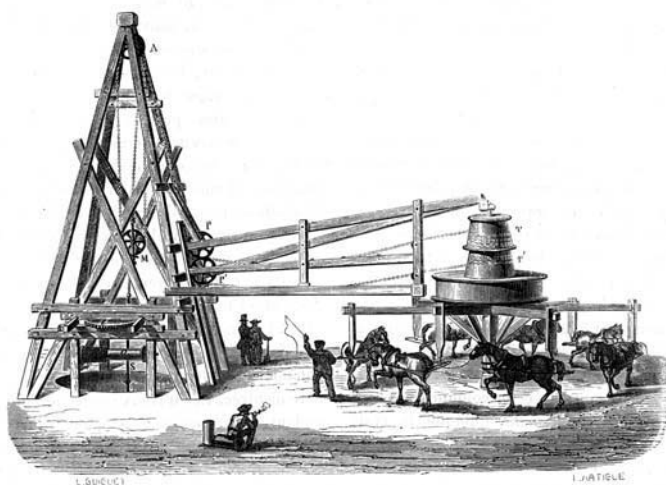


Figure 11.27. La foreuse du puits de Grenelle.

Bien entendu, cette opération fait beaucoup jaser. Des commentaires, « *vraiment incroyables* » selon Arago⁸³, sont insérés dans certains journaux en 1841-1842, alors que l'on approche du but : « *La question se complique de plus en plus ; elle s'embrouille. On est dans un ordre de phénomènes ignorés et il est difficile de prévoir comment on en sortira. En dépit de toutes les prévisions et de tous les calculs scientifiques, on ne sait pas d'où vient l'eau. Le puits de Grenelle paraît destiné à déjouer toutes les combinaisons de la science et à résister aux procédés les plus ingénieux de l'art.* » On pense même qu'il pourrait y avoir des effondrements, et que « *les eaux de la Seine pourraient un beau matin s'infiltrer par quelque fissure et disparaître dans le gouffre* ». Mais Arago a toujours affirmé que le succès de l'entreprise serait infaillible à condition de persévérer. Aux détracteurs, il fait entrevoir un avantage économique, celui de fournir de grandes quantités d'eau chaude qui pourrait, en circulant dans des tuyaux, servir à réchauffer « *des serres, des hôpitaux, des prisons* ». Finalement, l'étonnante prouesse technique qu'est ce puits artésien fera l'objet des plus grands éloges après son achèvement. Une colonne de fonte de 43 mètres de haut sera dressée sur la place de Breteuil afin que l'eau atteigne une altitude suffisante pour être acheminée par gravité jusqu'aux réservoirs du Panthéon, mais aussi pour commémorer la prouesse (figure 11.28). D'une esthétique discutable, elle sera détruite en 1903 et remplacée par un monument érigé en 1906 place Georges Mulot, tout près de la place de Breteuil.

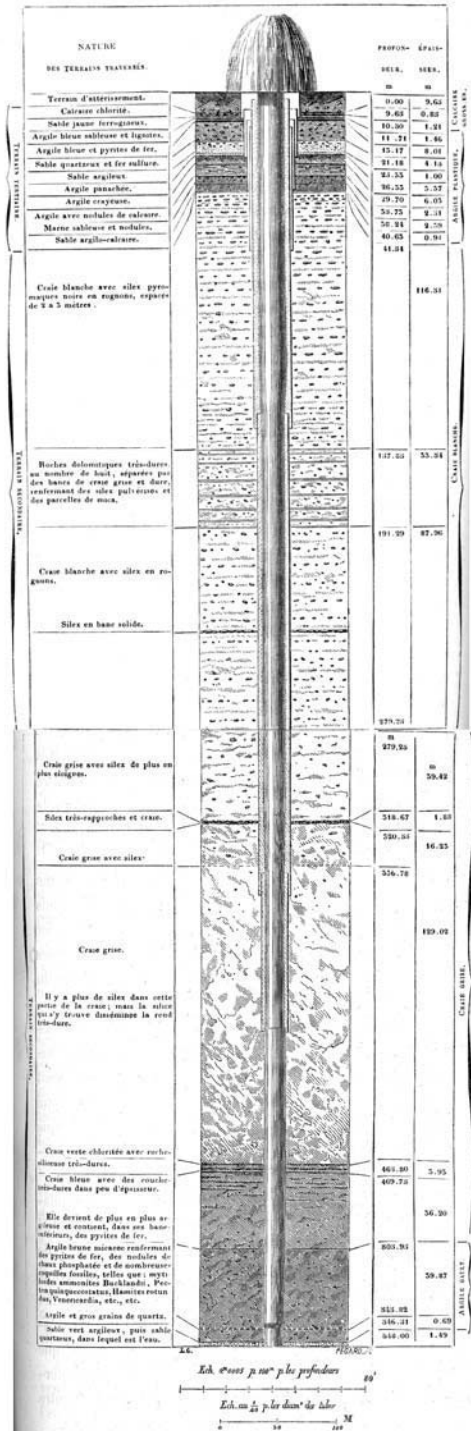


Figure 11.28. La colonne de la place de Breteuil.

Arago profite du forage pour mener des expériences thermométriques avec son ami Walferdin. Le 2 novembre 1840, le forage ayant atteint 505 mètres, il annonce à l'Académie que la température de la Terre augmente d'un degré quand on s'enfonce de 26,4 mètres. C'est une des rares mesures fiables de ce phénomène. Le forage servira aussi pour faire la première coupe géologique des sédiments du Bassin parisien (figure 11.29).

Si le puits de Grenelle a été le premier forage réussi à Paris, il ne sera pas le seul⁸⁴ : il en existe aujourd'hui une douzaine. Celui de Passy, décidé en 1855 pour arroser le bois de Boulogne et alimenter ses lacs artificiels, a fourni de l'eau en 1861, mais sa mise en service a occasionné une nette diminution de la production du puits de Grenelle. Il fonctionne toujours, après rénovation et approfondissement. D'autres puits alimentent partiellement des piscines, et celui de la Maison de la radio assure depuis 1963

Figure 11.29. Coupe géologique du sous-sol parisien réalisée lors du forage du puits artésien de Grenelle.



le chauffage et la climatisation de cet établissement grâce à des pompes à chaleur : l'utilisation géothermique prévue par Arago s'est donc réalisée. Mais les puits actuels ont perdu leur caractère artésien, la baisse de pression nécessitant aujourd'hui une pompe pour remonter l'eau en surface.

Chapitre 12

L'héritage d'Arago



Le modèle de la statue d'Arago élevée à Paris en 1893. Sculptée par Alexandre Joseph Oliva, que l'on voit à gauche, la statue sera placée sur un piédestal dû à Joannis. Les Allemands l'ont détruite pendant la deuxième guerre mondiale pour en récupérer le bronze, et seul le piédestal subsiste.

Au terme de notre ouvrage, il est temps de faire le bilan, et de décrire comment l'image d'Arago et la perception que l'on a de son œuvre ont évolué depuis sa disparition. Les textes qui parlent de lui à diverses époques sont assez nombreux, et il nous suffit de les suivre. Voyons d'abord ce qui s'est passé immédiatement après son décès.

Funérailles et discours

La mort d'Arago est vivement ressentie à l'Académie des sciences. Fait exceptionnel, l'Académie suspend sa séance le 3 octobre 1853 à l'annonce de son décès survenu la veille : elle « *se lève en silence et se retire pénétrée d'affliction* »¹. Le bref discours prononcé la semaine suivante par le botaniste Charles Combes, président de l'Académie, exprime une émotion sincère et rappelle l'attachement d'Arago à l'institution :

« La mémoire d'Arago sera particulièrement en vénération dans le sein de notre Compagnie, où il comptait autant d'amis que d'admirateurs. Ces sentiments étaient dus à la noble générosité de son âme, à ses belles découvertes dont l'éclat se reflétait sur le Corps dont il était l'interprète et le représentant vis-à-vis du public, au très-vif intérêt qu'il portait à la gloire de l'Académie des Sciences. Nous n'oublierons pas qu'il lui a consacré, dans ces dernières années, tous les instants de relâche laissés par la longue maladie qui a terminé, avant le temps, une vie si précieuse à ses confrères, au pays, à la science. »

La notoriété d'Arago est telle qu'il est impossible au Pouvoir de négliger sa disparition. L'Empereur se sent obligé de lui organiser des funérailles solennelles, et délègue le maréchal Vaillant pour le représenter². Le ministre de la Marine et des Colonies est présent, car on a gardé un bon souvenir du bref passage d'Arago dans cette fonction. Les représentants de l'Institut, de l'École polytechnique et du Conseil général de la Seine sont nombreux. Une foule énorme, qui a appris la nouvelle par une annonce dans le journal *Le Globe*, accompagne le convoi de l'Observatoire au cimetière du Père-Lachaise, en passant par l'église Saint-Jacques-du-Haut-Pas où a lieu le service funèbre (figure 12.1). L'armée est là, pour rendre hommage au défunt mais surtout pour éviter les débordements

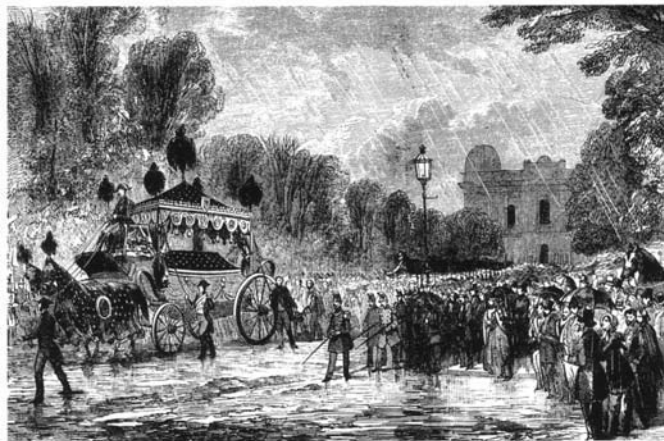


Figure 12.1. Le cortège des funérailles d'Arago partant de l'Observatoire.

éventuels d'une foule venue rendre hommage à l'homme politique plus qu'au savant.

Cependant, c'est bien le savant que l'on célèbre dans les discours officiels, pour éviter de parler de l'homme politique. Ses amis s'y attendaient : Alexandre Dumas l'a écrit dans son journal pendant l'agonie d'Arago. Même le secrétaire perpétuel de la section des Sciences physiques de l'Académie des sciences^a, Pierre Flourens, grand ami d'Arago, avoue le fait dans le discours qu'il prononce au nom de l'Académie devant la tombe³ :

« Interprète de cette Académie dans laquelle M. Arago a siégé pendant près d'un demi-siècle, j'ai voulu ne parler que de l'homme qui nous a appartenu. Cet homme doit survivre pour rester une des illustrations scientifiques de notre pays. »

Certes, on ne peut reprocher à Flourens de rester ici dans son rôle, mais aucun autre discours ne fait non plus allusion aux activités politiques d'Arago, à l'exception de celui du vice-amiral Charles Baudin, président du Bureau des longitudes, qui se borne à rappeler l'activité d'Arago en tant que ministre de la Marine et des Colonies. Un long article nécrologique de Barral⁴, où l'on devine pourtant des sympathies politiques proches de celles d'Arago, ne rappelle que l'abolition de l'esclavage et contient les phrases suivantes :

^a Arago était le secrétaire perpétuel de l'autre section, celle des sciences mathématiques.

« Nous n'avons pas ici à apprécier l'homme d'État, à montrer les actes de l'un des chefs du gouvernement révolutionnaire. Il a écrit que, « pour ce qui touche la politique, on ne peut sans danger s'abandonner aux inspirations de son cœur ». Nous nous taisons à sa voix, en affirmant seulement que dans tous les postes qu'il a occupés, il s'est toujours montré grand citoyen. Après le 2 décembre, il refusa le serment, et devant le nom d'Arago s'arrêtèrent les rigueurs de la politique, qui ne devrait jamais intervenir dans les choses de la science. »

On ne trouvera rien de plus dans les nombreux articles parus dans la presse quotidienne. Dans tous ces textes, on glorifie sans réserve l'œuvre scientifique d'Arago, en insistant souvent sur ses activités de promoteur de la science, et l'on met dans l'ombre ses activités politiques, suggérant même qu'il aurait pu s'en repentir. Écoutons Sainte-Beuve, cinq mois après la mort d'Arago⁵ :

« Je me figurerais volontiers une double statue d'Arago : l'une de lui jeune, dans la beauté de son ardeur et dans son plus mâle essor, voué à la pure science, à la mesure du globe, à la découverte des espaces célestes et des lois de la lumière, tel qu'il pouvait être à vingt et un ans dans ses veilles sereines sur le plateau du Desierto de las Palmas. La seconde statue, qu'il conviendrait peut-être de placer sur un écueil, nous le représenterait après la double carrière fournie, figure visiblement attristée, imposante toujours ; de haute stature ; la tête inclinée et fléchie, et comme à demi foudroyée ; semblant avertir par un geste les savants de ne point donner trop à l'aveugle sur le récif populaire : mais même alors, et de quelque côté qu'on regarde, gravez et faites lire encore sur le piédestal la date mémorable des services rendus^b. »

Quant à Eugène de Mirecourt, un polémiste sulfureux qui écrit un petit livre sur Arago en 1856, il est probablement à l'origine d'une légende tenace qui prétend que la maladie d'Arago est due à son découragement après l'échec de la deuxième République, alors que le diabète l'avait atteint bien avant 1848 :

« Les fatales journées de juin vinrent ensanglanter Paris. Ce noble cœur fut saisi d'un découragement profond. Tous les résultats de la république trompaient son attente, et les secousses l'avaient brisé. Dès lors il ressentit les premières atteintes de la maladie qui devait le conduire au tombeau. »

^b Il ne s'agit sans doute que des services à la science !

Malgré la recommandation de Sainte-Beuve, on ne gravera pas « *la date mémorable des services rendus* » sur le monument funéraire d'Arago au cimetière du Père-Lachaise, mais on y inscrira une liste de ce que l'on considère comme ses principaux travaux scientifiques, à savoir :

« *Prolongation de la Méridienne.
Polarisation colorée.
Magnétisme de rotation.
Méthode et observation photométrique.* »

Un projet pour la tombe, dû à David d'Angers, grand ami d'Arago, ne pourra pas être réalisé (figure 12.2) ; le monument funéraire (figure 12.3) ne comporte finalement qu'un buste, copie de celui que David d'Angers avait sculpté en 1843 pour l'hôtel de ville d'Estagel, placé sur une cippe de granit due à Félix Duban. Le peintre et sculpteur Paul-Joseph Chenavard proposera en 1858 d'ajouter au tombeau un édicule avec un gisant d'Arago qui ne sera pas non plus réalisé, bien qu'il « *eut été d'un grand effet* » (figure 12.4).



Figure 12.2. Projet de David d'Angers pour la tombe d'Arago.



Figure 12.3. La tombe d'Arago au cimetière du Père-Lachaise.

Nouveaux temps, nouvelles attitudes

Quelques réserves vont bientôt se faire sentir sur l'action d'Arago à la Chambre des députés. Elles ne concernent pas son discours sur le suffrage universel, récupéré par Napoléon III qui en a profité dans le plébiscite qui l'a porté au pouvoir absolu, mais les chemins de fer. En voici un exemple, qui date de 1857⁶ :

« *De 1830 à 1848, Arago a usé, en maintes occasions, de son influence comme savant pour faire triompher des mesures utiles. Il ne faut guère excepter que la question des chemins de fer, dans laquelle, malgré les jets lumineux dont ses rapports sont remplis, il laissa visiblement dominer l'élément politique. Mieux vaudrait pour la science qu'il l'eût jusqu'à la fin servie sans partage.* »

Pereire à Estagel

En 1863, le riche banquier Isaac Pereire, qui avait bien connu Arago et avait même assisté à quelques-unes de ses leçons d'astronomie, se lance dans la politique et se

Figure 12.4. Le projet de Chenavard pour la tombe d'Arago. Chenavard voulait ajouter des édicules de son cru aux tombeaux des grands hommes de son temps. Aucun de ses projets n'a été réalisé.



Figure 12.5. Le modèle de la statue d'Arago à Estagel, par Alexandre Joseph Oliva. En bronze, cette statue a été fondue par les Allemands pendant la deuxième guerre mondiale, et remplacée en 1955 par une nouvelle statue de bronze due à Marcel Homs.

présente aux élections législatives dans les Pyrénées-Orientales. Avec beaucoup d'habileté, il récupère avec succès les voix qui allaient précédemment vers le clan Arago, en se faisant le thuriféraire de François. La seule promesse qu'il va tenir après son élection (il y en avait beaucoup) est l'érection à Estagel d'une statue d'Arago (figure 12.5). Elle ne lui coûte d'ailleurs pas grand chose, car les fonds viennent d'une souscription publique à laquelle souscrivent près de 2 000 estagellois sur environ 2 500 habitants, flattés de cette « *initiative inédite dans les Pyrénées-Orientales, où aucun mortel, roi ou grand personnage n'a accédé à un tel honneur — en dehors justement de François Arago dont un buste avait été installé naguère à Estagel.* »⁷

L'inauguration de la statue a lieu le 30 août 1865, en l'absence des proches d'Arago, qui ne veulent pas cautionner la manœuvre de Pereire. Celui-ci ne parvient qu'à attirer un neveu de François, mais s'assure du concours de savants éminents, parmi lesquels nous citerons Henri Sainte-Claire Deville et Joseph Bertrand, délégués par l'Académie des sciences (Bertrand fera un discours), l'économiste Michel Chevalier représentant l'École

polytechnique, Claude Bernard, Marcellin Berthelot, sans oublier Barral et Breguet. Mais l'évêque, M^{sr} Ramadié, se fait excuser.

Le discours de Pereire⁸ est très bien documenté et d'une grande habileté. Ne cachant rien de l'activité politique d'Arago, il la récupère complètement. Il va jusqu'à affirmer que les vues sociales de l'Empereur sont proches de celles d'Arago :

« Arago, bien plus préoccupé en réalité du fond que de la forme, désirait, avant tout, l'avancement de l'instruction publique et du bien-être des masses. [...] Telle est, Messieurs, la large base sur laquelle s'est placé celui qui préside aujourd'hui aux destinées de la France. Telle est la cause de l'affection universelle dont il est entouré. Vous le savez, en effet ; l'objet multiples de ses constantes préoccupations, c'est le développement de l'instruction à tous les degrés, primaire, secondaire, professionnelle ; c'est l'amélioration progressive de la viabilité du territoire, au moyen des chemins de fer... [etc.]. »

La seule réserve qu'il émet concerne encore les chemins de fer. Il est compétent, puisqu'il possède avec son frère une partie importante du réseau Paris-Lyon-Méditerranée (PLM) :

« [Arago] aurait désiré qu'on attendit, pour mettre la main à l'œuvre, que l'art de la construction des chemins de fer eut fait de nouveaux progrès. Or, il n'est pas dans la nature humaine d'atteindre la perfection ; jamais, d'ailleurs, on ne peut se flatter d'en franchir les degrés d'un seul bond. Les inconvénients d'une application imparfaite sont toujours moins grands que ceux qui résulteraient d'un ajournement indéfini. [...] Arago a été mieux inspiré relativement à la question de savoir à qui devait être confiée la construction de ces voies nouvelles. [Évidemment, puisque Pereire en a été un des grands bénéficiaires !] »

La récupération d'Arago ne se borne pas là. Maintenant qu'il ne peut plus s'opposer à l'Empereur et qu'il est toujours célèbre, on ne voit que des avantages à ce que son nom soit donné au large boulevard qu'Haussmann a fait percer près de l'Observatoire.

La Troisième République

Changement de décor avec l'avènement de la Troisième République. On va encore récupérer l'homme politique,

mais dans la direction opposée. Les discours prononcés lors de l'inauguration d'une nouvelle statue d'Arago à Perpignan, les 21 septembre 1879, sont révélateurs^c. Il n'est pas question de faire la moindre réserve ni sur l'œuvre scientifique, ni sur l'œuvre politique d'Arago. Voici un extrait du discours de Jules Ferry, alors ministre de l'Instruction publique⁹ :

« Les travaux immortels et la gloire scientifique de François Arago font partie du patrimoine de l'humanité. La postérité avait pour lui commencé pendant la vie ; les années écoulées n'ont fait que ratifier le jugement des contemporains. [...] Il y avait dans le savant un citoyen, un patriote, un politique de hautes visées, un démocrate ardent, un républicain. Il a appartenu à l'âge héroïque et tourmenté de la République militante ; nul n'a représenté mieux que lui dans la première moitié du siècle, les grandeurs et les vicissitudes de notre parti. Il a compté parmi les meilleurs, les plus purs, les plus clairvoyants : il a été des plus résolus, sans cesser d'être des plus sages. »

En 1893, on inaugure à Paris une autre statue d'Arago élevée grâce à une souscription ouverte en 1886, année du centenaire de la naissance d'Arago (voir la photographie sous le titre de ce chapitre et les figures 12.6 et 12.7)^d. Les oppositions politiques ont retardé sa mise en place ; lors de la cérémonie, l'amiral Mouchez, directeur de l'Observatoire, est mort ainsi que le sculpteur, Oliva. Étienne Arago est également décédé, et c'est sans doute un soulagement de ne pas voir ce personnage si encombrant assister à l'inauguration. L'accent est davantage mis sur la science dans les sept discours qui sont prononcés pendant la cérémonie, mais l'œuvre politique d'Arago est encore bien évoquée. On notera en particulier le discours

^c Le piédestal de cette statue due à Antoine Mercié, qui est toujours en place, comporte trois bas-reliefs en bronze représentant des épisodes de la vie d'Arago. L'un d'eux le représente apaisant la colère populaire sur les barricades de 1848, et sur un autre (figure 11.3) il est censé dicter à Lucie Laugier *l'Astronomie populaire*.

^d Tout ne s'est pas déroulé sans difficulté : en février 1886, le Conseil municipal de Paris n'a pas autorisé le Comité d'organisation à donner un banquet public, et a refusé une subvention pour la statue. Les choses se sont arrangées ensuite, mais l'opposition de droite a réussi à retarder la cérémonie. Voir Fontveille (s.d.).

de François de Mahy, député de la Réunion, qui rappelle « *au nom des colonies françaises* » le rôle d'Arago dans l'abolition de l'esclavage¹⁰ (Schœlcher est encore vivant, mais retenu chez lui par la maladie, et les deux hommes sont mis sur le même plan dans ce discours).

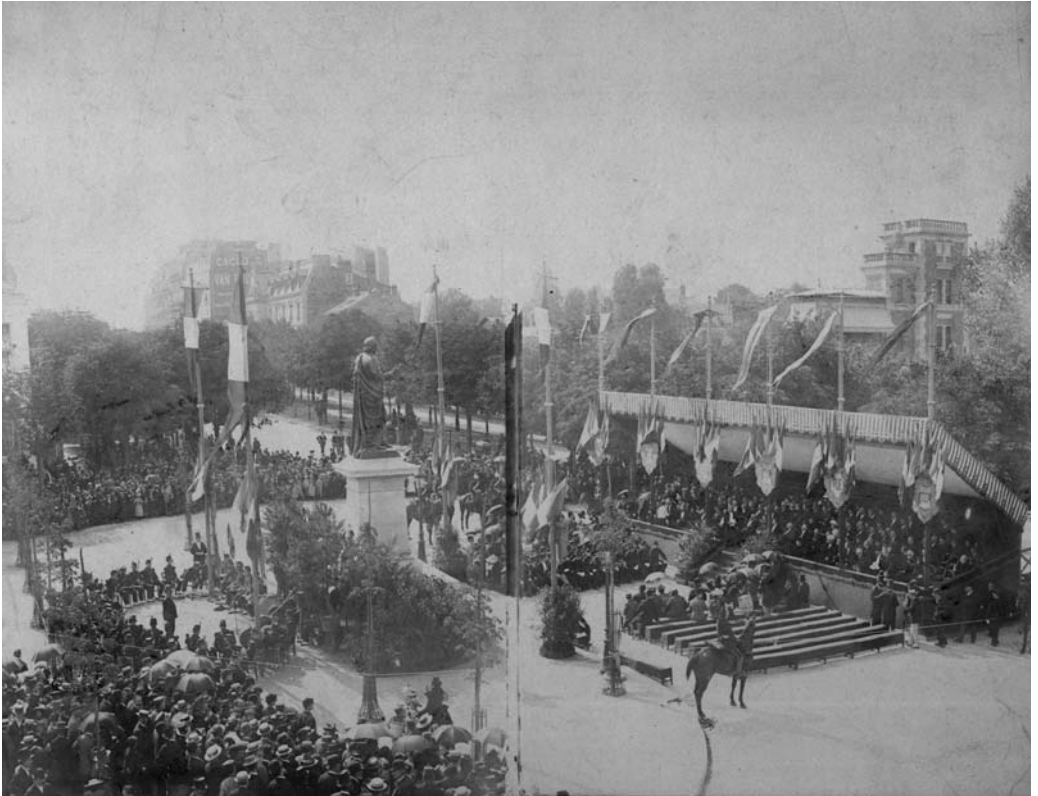
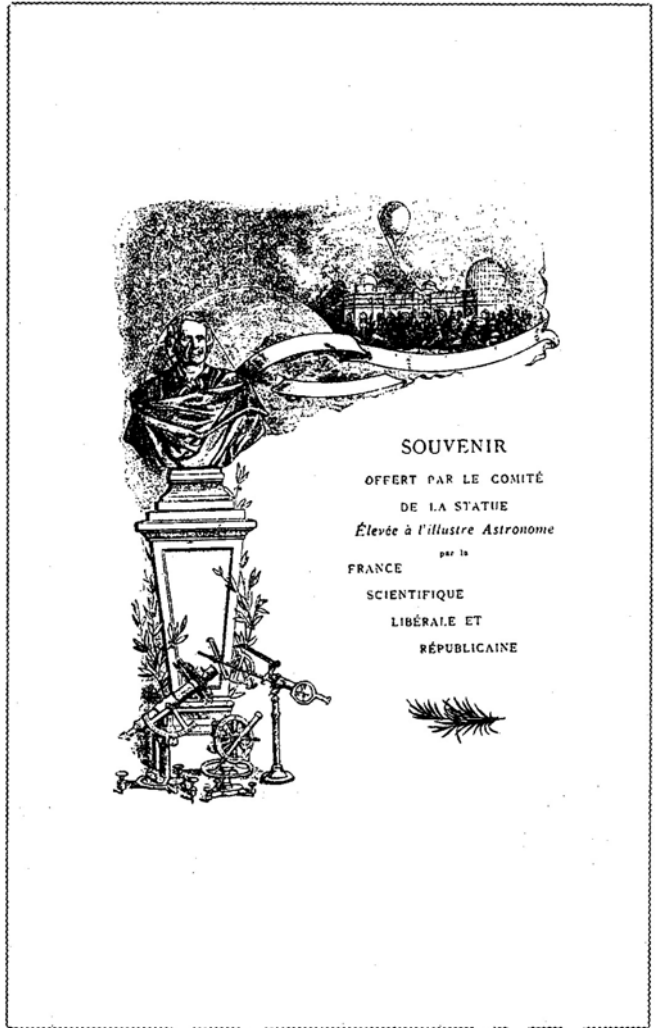


Figure 12.6. Inauguration de la statue d'Arago à Paris en 1893, place de l'Île de Sein. On aperçoit à droite derrière la tribune, de l'autre côté du boulevard Arago, le bâtiment de l'équatorial coulé de l'Observatoire de Paris.

Le discours de l'astronome Félix Tisserand est le premier à mettre en valeur ce qu'a réellement apporté Arago à l'astronomie, encore qu'en tant que spécialiste de mécanique céleste il ne parle guère que du système solaire :

« On peut dire qu'Arago a introduit la physique en astronomie et établi son rôle indispensable. Avant lui, les astronomes s'étaient préoccupés surtout des mouvements des planètes,

Figure 12.7. Vignette éditée par le comité de la statue d'Arago en 1893. La cérémonie comportait une ascension en ballon. On voit près du piédestal quelques-uns des instruments d'Arago. Le buste d'Arago représenté ici est un plâtre d'Oliva, conservé à l'Observatoire de Paris.



cherchant à les expliquer dans leurs moindres détails par la loi de la gravitation. Arago s'occupe de leurs surfaces et des phénomènes qui s'y développent sans cesse.

« Le polariscope lui montre que la surface enflammée qui limite le contour du soleil est gazeuse, et lui donne ensuite des renseignements précieux sur la lumière des comètes.

« C'est une autre application de la physique qui lui fournit des moyens très précis pour la mesure des diamètres des planètes ou pour celle de leurs éclats.

« Rien de plus ingénieux que son explication de la scintillation des étoiles, fondée sur les propriétés remarquables que Fresnel venait de découvrir aux rayons lumineux. [...] »

« Arago doit être considéré comme le véritable fondateur de l'astronomie physique, cette branche de la science qui a pris depuis un essor merveilleux. Il avait pressenti l'importance future des applications de la photographie à l'étude des astres. »

« Mais il ne pouvait pas prévoir qu'un jour, à côté de la physique, la chimie pénétrerait aussi dans le domaine de l'astronomie, et nous dévoilerait la constitution intime des corps célestes : l'analyse spectrale n'a été découverte en effet qu'après la mort d'Arago. »

Dans son discours posthume, lu par Tisserand, Mouchez reste plus vague et émet quelques réserves sur le savant¹¹ :

« Arago a sans doute beaucoup contribué par ses propres travaux à l'avancement des sciences ; mais ce qui caractérise le mieux son œuvre et son génie, c'est la remarquable intuition qui lui permettaient d'entrevoir rapidement les conséquences les plus lointaines des idées nouvelles. [...] La multiplicité de ses occupations, sa fiévreuse activité à la recherche de nouvelles expériences, ne lui permettaient guère d'approfondir lui-même les faits qu'il découvrait ; mais il les signalait, avec un rare désintéressement, à ses collègues ou à de jeunes savants qu'il aidait ensuite de ses conseils et de sa féconde collaboration pour en déduire les conséquences prévues. »

Cependant, au nom de l'Académie des sciences et du Bureau des longitudes, Alfred Cornu défend la mémoire d'Arago contre les doutes concernant la qualité de ses recherches personnelles, et insiste à juste titre sur ses talents de vulgarisateur¹² :

« Par un singulier retour de la faveur publique, cette réputation de grand vulgarisateur que ses admirables notices de l'Annuaire du Bureau des Longitudes propageaient au dehors, ses succès oratoires à la tribune parlementaire, ont plutôt obscurci que rehaussé l'éclat de ses travaux personnels : rien n'est plus injuste. »

À vrai dire, Jamin avait déjà fait les mêmes réserves que Mouchez dans son éloge d'Arago à l'Académie des sciences¹³, éloge retardé jusqu'en 1885 pour des raisons

diverses, notamment politiques. Ces réserves sont assez sévères mais parfaitement justifiées :

« Il est rare qu'un inventeur ait jamais atteint les limites de sa découverte ; il en a cherché les conséquences où elles n'étaient pas, il s'est égaré dans un labyrinthe où ne le guidait aucun fil, il a passé près de la vérité sans la voir, et finalement il a laissé à ses successeurs la moisson qu'il avait semée. Comme tant d'autres avant lui, Arago laissa sans la compléter la grande trouvaille qu'il venait de faire [il s'agit de la polarisation rotatoire]. Il était doué d'une clairvoyance sans pareille, devinait les découvertes avant de les faire, mais il n'avait pas la patience des détails ; il ouvrait des mines sans les exploiter, commençait des travaux sans les poursuivre. Sa curiosité première une fois satisfaite, il se livrait à des curiosités nouvelles. Il ressemblait à un voyageur pressé qui parcourt une contrée vierge, lui donne un nom, et se hâte vers des horizons plus lointains. Expérimentateur par inspiration, découvreur par instinct, il avait trop de passion, trop peu de loisirs : trop de fertilité dans l'esprit, pas assez de cette persévérance obstinée qui achève ce qui est commencé. Que d'autres se contenteraient de pareils défauts ? Quant aux idées théoriques qui enferment une science entière dans quelques hypothèses générales et laissent une trace ineffaçable, il n'en produisit aucune, il les repoussait quelquefois, lors même que ses propres expériences y avaient conduit les autres. [...] Ce que nous devons admirer avant toute chose dans l'œuvre scientifique d'Arago, c'est l'étonnante fécondité de cet inventeur incomparable ; il était propre et prêt à tous les genres de recherches. »

Au début du ^{xx}e siècle, on peut lire un intéressant témoignage de l'opinion de l'époque sous la plume de Wilfrid de Fonville¹⁴, un vulgarisateur de la science qui a vécu assez longtemps pour avoir connu Arago, et dont le père, « un industriel distingué » avait été « fortement encouragé » par Arago¹⁵. Fonville ne pouvait qu'avoir de la sympathie pour ce dernier, d'autant plus qu'il était un républicain convaincu. Il met très clairement en évidence le fait que le côté politique d'Arago tend à occulter son côté scientifique, et il sous-entend que ses découvertes n'auront peut-être pas la pérennité dont se glorifiaient la plupart des commentateurs précédents :

« Il n'en est pas de la gloire des savants comme de celle des poètes, des philosophes et des artistes qui ont réalisé le beau et trouvé le vrai. Il y a quelque chose d'éphémère et

de transitoire dans leurs plus belles découvertes. En effet, elles sont l'origine de progrès qui les passent ; plus elles sont fécondes, plus les conséquences qu'elles produisent sont de nature à faire oublier la source d'où elles découlent. On comprend donc facilement qu'ainsi mutilé, Arago ait été relativement oublié. Le temps a d'autant plus facilement porté préjudice à sa mémoire que ses successeurs se sont presque toujours abstenus de suivre son exemple. À mesure que les sessions parlementaires se succèdent, on voit l'éloignement des savants pour les affaires publiques aller en augmentant. »

Puis Fonville examine les différents aspects de l'œuvre d'Arago, auquel il ne passe rien, même s'il s'emploie à lui trouver des excuses :

« Arago a commis bien des erreurs dans des circonstances importantes, erreurs qu'il n'y a point à dissimuler car elles sont de nature fort honorable, elles ne portent aucune ombre à sa gloire.

« Pendant plusieurs années, de même que Thiers, il n'a pas cru à l'avenir des chemins de fer. [...]

« Arago commit une autre erreur notable, ce fut à propos des fortifications de Paris dont il était partisan déclaré. »

Les temps modernes

Sautons encore un demi-siècle pour arriver à un texte d'André Danjon, un des brillants successeurs d'Arago à la tête de l'Observatoire de Paris¹⁶. De tous les commentateurs, c'est probablement lui qui, avec Jules Jamin en son temps, a le mieux saisi les qualités et les défauts d'Arago :

« La grande popularité, il l'a trouvée, il en a joui avec délices. Ses contemporains ont vu en lui l'un des plus grands hommes de son siècle, le Napoléon de la science. La perspective a changé. Bien plus que le talent, car il en avait, la persévérance et le goût du travail assidu ont manqué à Arago pour égaler Laplace, Fresnel, Ampère. On ne saurait placer Arago à côté de ces grands génies ; son œuvre n'a pas l'éclat qu'on lui voudrait. Elle a cependant contribué au progrès de la science, puisqu'elle a ouvert des chapitres nouveaux... qu'il a laissés à d'autres le soin de développer. Arago était beaucoup plus attiré par la découverte de nouveaux phénomènes que par l'approfondissement et l'application pratique de



Figure 12.8. Un des 135 médaillons placés par l'artiste conceptuel hollandais Jan Dibbets le long du méridien de Paris, de la Cité universitaire à la porte Montmartre¹⁷. Ces médaillons énigmatiques tracent dans la capitale une ligne dont l'Observatoire est le centre symbolique. Ils se substituent depuis 1994 à la statue de 1893 (voir la figure en tête du chapitre).

ses propres découvertes. [...] Plus que tout autre, il a contribué à la prospérité des grandes institutions et des grands établissements scientifiques. Il a su reconnaître un Fresnel, un Foucault, un Le Verrier, d'autres encore ! Il leur a tendu la main et les a aidés dans leur ascension. »

On ne peut que partager cette opinion. C'est aussi celle de Dumas, dont la première édition du livre est antérieure de trois ans à l'étude de Danjon, et de tous ses successeurs. Mais on ne saurait pour autant sous-estimer l'apport personnel d'Arago à la physique et à l'astronomie, qui est loin d'être négligeable : découvrir la nature gazeuse de la surface du Soleil et des étoiles n'est pas rien ! Aujourd'hui, l'homme politique a été quelque peu oublié dans les livres d'histoire, mais les astronomes et les physiciens maintiennent vivant le souvenir du savant, dont on peut lire le nom sur des médaillons que le promeneur rencontre sur le sol parisien (figure 12.8).

Grandeur et décadence de la physique et de l'astronomie françaises au XIX^e siècle

La première moitié du XIX^e siècle voit apparaître en France une incroyable floraison de scientifiques et d'ingénieurs de premier plan. Certes, de grands « géomètres » comme Delambre, Lagrange, Laplace ou Legendre ont survécu à la Révolution, de même que des savants comme Coulomb, Cuvier, Lamarck ou Monge qui n'ont pas subi le sort malheureux de Condorcet ou de Lavoisier. Mais bien d'autres étoiles sont nées, souvent issues de la promotion sociale qu'ont permise les grandes écoles gratuites créées par la Convention. Et puis, comme l'a bien montré Jacques Debyser¹⁸, les temps sont mûrs pour l'épanouissement de la science, car le Siècle des lumières a dégagé la pensée des présupposés métaphysiques hérités du Moyen-Âge. Pour nous limiter à la physique, on voit apparaître les fondements de tout ce qui nous sert aujourd'hui dans la vie quotidienne, à l'exception bien entendu de l'électronique et de l'informatique : optique, thermodynamique, électromagnétisme, télétransmissions. La technique n'est pas en reste : la photographie, les optiques des phares, la turbine, le moteur à explosion et le moteur électrique sont nés avant

1850. La première automobile va circuler peu après. Seuls le téléphone, la dynamo et l'alternateur devront attendre quelques décennies de plus, ainsi que l'avion.

Cependant, cette magnifique floraison va s'éteindre pendant la seconde moitié du XIX^e siècle, où l'on chercherait en vain dans notre pays des génies de la dimension de Laplace, de Fresnel, d'Ampère, de Sadi Carnot ou de Joseph Fourier. La faute en est à la sclérose des hommes et des institutions, après l'enthousiasme de la période romantique dont Arago a été le héraut. Les possibilités de promotion sociale qui avaient permis l'émergence de bien des talents se sont considérablement amoindries ; l'Académie des sciences se replie dans sa tour d'ivoire, et l'Université aussi ; la civilisation bourgeoise s'intéresse plus au progrès technique, qui est certes considérable, qu'à la recherche fondamentale. On ne retrouve pas dans notre pays l'audace de pensée d'un Maxwell, d'un Helmholtz, d'un Mach, d'un Lorentz, d'un Planck ou d'un Einstein, pour ne citer que ceux-ci ; les seuls physiciens que l'on pourrait leur comparer à l'époque sont Paul Langevin, Henri Poincaré et peut-être les Curie. La France a perdu sa suprématie, qu'elle ne retrouvera pas malgré Louis de Broglie, Jean Perrin, Louis Néel et les Joliot-Curie. Dans les années 1950 encore — et nous pouvons en témoigner personnellement — l'enseignement de la physique à l'Université était d'une médiocrité affligeante¹⁹. La situation s'est bien redressée depuis, mais nous revenons de loin.

L'astronomie, science plus ancienne et plus mûre que la physique, n'a pas subi autant de bouleversements au début du XIX^e siècle, du moins dans notre pays. Après Laplace et Delambre, on n'est pas impressionné par la qualité des astronomes de la génération d'Arago. Voici d'ailleurs ce qu'en dit Danjon²⁰ :

« Arago avait près de lui des collaborateurs dévoués, qui lui portaient une admiration proche de l'adoration. Les plus anciens étaient Mathieu, son beau-frère, et Laugier, qui fut le gendre de Mathieu. [...] Eugène Bouvard, Mauvais, Goujon, Barral, figuraient aussi parmi les fidèles. Si l'on en excepte Mathieu, bon mathématicien, cet entourage était médiocre. Il lui manquait, pour bien servir le Maître, les qualités complémentaires de ses défauts. »

Bien sûr, il y a Le Verrier, qui ne fait pas partie du clan Arago. Célèbre pour sa découverte de Neptune, il va passer le reste de sa vie à échafauder une théorie complète

du système solaire, dont l'intérêt premier à nos yeux est d'avoir mis en évidence une avance non expliquée de la longitude du périhélie de Mercure : ce sera la première preuve observationnelle de la validité de la Relativité générale d'Einstein. En parallèle ou à sa suite, on trouve d'autres spécialistes talentueux de la mécanique céleste comme Delaunay ou Tisserand, mais l'ancienne suprématie française dans ce domaine n'est plus : l'Angleterre, l'Allemagne et surtout les États-Unis avec Simon Newcomb sont devenus des concurrents redoutables. Seul Henri Poincaré, mathématicien visionnaire, précurseur de la théorie du chaos, émerge réellement au sommet de l'astronomie internationale.

Sur le plan de l'observation, la situation n'est pas brillante en France au XIX^e siècle ; nous nous sommes largement étendus sur ce point. Bien que Léon Foucault ait créé le télescope moderne, c'est à l'étranger que l'on en verra les meilleures réalisations. Notre pays ne peut guère s'enorgueillir pendant la seconde moitié du XIX^e siècle que de deux découvertes importantes : celle des étoiles à raies d'émission par Wolf et Rayet, faite en 1867 avec un des télescopes de Foucault, et celle, l'année suivante, due à Janssen et en même temps à l'Anglais Norman Lockyer, d'une raie solaire dont on montrera plus tard qu'elle est due à d'un nouvel élément, l'hélium. Les talents de photographes de nos astronomes vont s'épuiser dans la réalisation de la Carte du ciel, une entreprise gigantesque qui sera un demi fiasco. Quant à l'astrophysique, elle disparaît, presque mort-née, avec Arago. Elle ne commencera à revivre qu'avec Jules Janssen dix ans après, puis plus tard avec Henri Deslandres ; mais elle n'a pas suscité beaucoup d'intérêt de la part des astronomes « classiques », et presque aucun de la part des physiciens. Il est vrai que, faute de grands télescopes, il a fallu pratiquement se limiter à l'observation du Soleil et des planètes jusqu'à la deuxième guerre mondiale, avec quelques incursions en astronomie stellaire : nous avons manqué toutes les grandes découvertes, qui ont été faites en Allemagne, en Angleterre et aux États-Unis, aussi bien en ce qui concerne l'observation que la théorie. Ce n'est qu'à partir de 1936 que la France a regagné, très progressivement, sa place parmi les nations où l'astronomie est florissante²¹.

Appendice 1

La vie et l'œuvre d'Arago dans son temps

Vie	Œuvre et carrière scientifique	Événements scientifiques et politiques
1786. Naissance à Estagel de Dominique François Arago.	1803. Arago est reçu à l'École polytechnique.	
1804. Arago refuse de féliciter Napoléon 1 ^{er} .		Sacre de Napoléon I ^{er} .
1805. Arago s'installe à l'Observatoire de Paris.	Laplace propose Arago au Bureau des longitudes pour le poste de secrétaire-bibliothécaire de l'Observatoire de Paris. 1805-1807. Arago travaille avec Biot sur la réfraction des gaz, commence des recherches astronomiques, notamment sur la vitesse de la lumière, et part en 1806 avec Biot prolonger la méridienne de Paris vers les Baléares. 1807. Arago, toujours en Espagne, est nommé astronome adjoint au Bureau des longitudes.	1806-1808. Blocus continental, destiné à fermer au commerce de l'Angleterre les ports du continent.
1808. Début des tribulations d'Arago en Espagne et en Algérie.		1808-1814. Guerre d'Espagne.

	<p>1809. Arago rentre en France et est élu membre titulaire de la première classe de l'Institut.</p> <p>A l'École polytechnique, il devient suppléant de Monge, professeur d'analyse appliquée à la géométrie. Il se lie d'amitié avec Humboldt et Gay-Lussac ; travaux sur la vitesse de la lumière.</p>	
<p>1811. Arago épouse Lucie Carrier-Besombes.</p>	<p>Arago découvre la polarisation rotatoire chromatique ; il montre que le ciel bleu est polarisé, de même que la lumière solaire réfléchie par la Lune ou par la queue des comètes ; il découvre la nature gazeuse du Soleil et des étoiles.</p> <p>1812. Arago devient professeur adjoint de géométrie analytique et de géodésie à l'École polytechnique.</p> <p>1813. Début des cours publics d'astronomie du Bureau des longitudes confiés à Arago.</p>	
<p>1814. Mort du père d'Arago.</p>	<p>Arago travaille avec Fresnel sur les interférences, et explique la scintillation des étoiles.</p> <p>1816. Arago est nommé professeur à l'École polytechnique ; avec Berthollet, il fonde les <i>Annales de chimie et de physique</i>.</p> <p>1820. Arago montre qu'un courant électrique peut aimanter le fer.</p>	<p>Louis XVIII accorde la charte instaurant la monarchie constitutionnelle.</p> <p>1815. Les Cent-Jours. Nouvelle restauration de la monarchie.</p>

	<p>1822. Arago est élu membre titulaire du Bureau des longitudes en remplacement de Delambre.</p>	<p>1824. Mort de Louis XVIII. Avènement de Charles X.</p>
<p>1829. Mort de l'épouse d'Arago.</p>	<p>1825. Arago découvre le « <i>magnétisme de rotation</i> ».</p>	
<p>1830. Arago devient conseiller général de la Seine.</p>	<p>Arago est élu secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences (section des sciences mathématiques).</p>	<p>Les Trois Glorieuses (27, 28 et 29 juillet) portent au pouvoir Louis-Philippe.</p>
<p>1831. Arago est élu député à Paris et dans les Pyrénées-Orientales.</p>		
<p>1834. Arago est réélu député à Perpignan.</p>	<p>Arago est nommé directeur des observations de l'Observatoire de Paris.</p> <p>1835. Arago crée les Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences (CRAS).</p>	
<p>1837. Arago est réélu député.</p>		
<p>1839. Arago est réélu député.</p>	<p>1840. Photos de la Lune et d'une éclipse partielle de Soleil, avec Daguerre.</p>	<p>Achat par l'État du procédé photographique de Daguerre à l'instigation d'Arago.</p> <p>Discours de François Arago sur la Réforme électorale (16 mai).</p>
<p>1841. Achèvement de l'amphithéâtre à l'Observatoire de Paris.</p>		
<p>1842. Arago est réélu député.</p>		

1843. Arago participe à la fondation du journal *La Réforme*.

Arago tente de confirmer la théorie ondulatoire de la lumière en comparant sa vitesse dans l'air et dans l'eau.

1845. Mort de la mère d'Arago.

1846. Le 17 décembre, Arago donne son dernier cours public d'astronomie populaire.

1848. 27 février : Arago est un des signataires de la proclamation de la République. Membre du gouvernement provisoire, il est nommé Ministre de la marine et des colonies puis de la guerre.
4 mars : Arago délègue à Victor Schœlcher tous ses pouvoirs pour régler la question de l'émancipation des esclaves et crée une commission *ad hoc*.
27 avril : signature du décret d'abolition de l'esclavage.
5 mai - 25 juin : Arago est président de la Commission exécutive et exerce les fonctions de chef de l'État. Il se retire partiellement de la vie politique après les émeutes de juin, restant cependant membre du conseil général de la Seine jusqu'en 1851.
10 décembre : Louis-Napoléon Bonaparte est élu Président de la République.

1849. Arago est réélu député.

1851. Répression contre la famille Arago.

Coup d'État de Louis-Napoléon Bonaparte.

1852. Arago refuse de prêter serment à l'Empereur, en offrant sa démission de Directeur des observations. Il obtient d'en être dispensé.

Louis-Napoléon Bonaparte est proclamé Empereur sous le nom de Napoléon III.

1853. Mort d'Arago, miné par le diabète et aveugle. Le Verrier lui succède à la tête de l'Observatoire.

1854-1860. Publication par J.-A. Barral des *Cœuvres complètes d'Arago*, en 17 volumes, incluant l'*Astronomie Populaire*.

Appendice 2

La photométrie d'Arago

On ne peut, à l'époque d'Arago, que comparer à l'œil des intensités lumineuses égales. Il faut donc, pour comparer l'éclat de la source à étudier avec celui d'une source de comparaison, atténuer de façon connue la lumière d'une de ces sources pour la rendre égale à celle de l'autre. Une façon commode pour ce faire est de faire passer la lumière provenant de la source la plus intense à travers un polariseur, puis à travers un autre polariseur servant d'analyseur. En tournant l'un par rapport à l'autre, on atténue la lumière à volonté (voir la figure 3.13). Mais il est nécessaire de savoir de quelle quantité la lumière est atténuée en fonction de l'angle entre la direction du polariseur et celle de l'analyseur. C'est à cela que va s'attaquer Arago d'une façon assez complexe, mais logique, qui nécessite deux étapes successives que nous allons décrire.

Première étape : le photomètre d'Arago

Arago va d'abord mesurer la fraction de la lumière qui est transmise par une lame de verre oblique, et la fraction qui est réfléchiée par cette lame. Il fait construire à cet effet par Gambey un appareil qu'il appelle *photomètre*. Cet appareil est directement inspiré des expériences de Lambert. Présenté à l'Académie des sciences le 11 août 1845, il connaît un certain succès : des appareils de ce type seront commercialisés par le constructeur parisien Jules Duboscq à partir de 1849 (figure A2.1 et figure A2.2). Arago fait remarquer que son photomètre fonctionne avec la lumière du jour, qui est relativement stable, plutôt qu'avec des lumières artificielles (chandelles, bougies ou autres) dont la stabilité est incertaine.

Voici comment fonctionne ce photomètre. Dans une pièce obscure, on vise avec le tube KL, qui ressemble à une lunette, la lumière provenant d'un grand écran de

Figure A2.1. Le photomètre d'Arago construit par Duboscq, vue perspective. Explications dans le texte.
Le prototype de cet instrument, construit par Gambey et légèrement différent, est conservé à l'Observatoire de Paris.

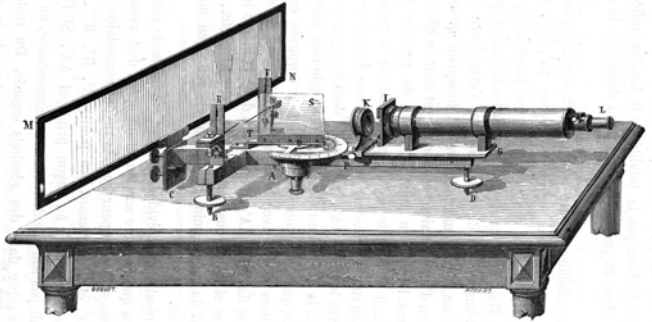
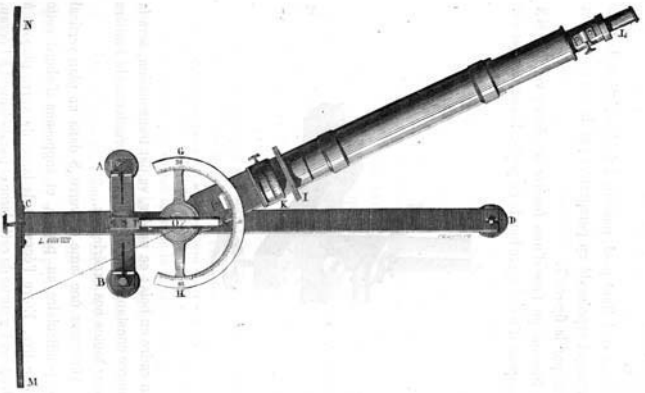


Figure A2.2. Le photomètre d'Arago vu de dessus. Explications dans le texte.



papier éclairé par l'arrière de façon uniforme. Ce tube est muni, au lieu d'un objectif, d'une fente verticale qui délimite un faisceau étroit. Une grande lame de verre est placée verticalement, perpendiculairement à l'écran, et l'on voit à la fois à travers le tube la lumière de l'écran transmise par la lame et la lumière qu'elle réfléchit. Ces deux lumières sont partiellement obstruées entre l'écran et la lame de verre par deux tiges noires horizontales, légèrement décalées en hauteur l'une par rapport à l'autre, de façon à pouvoir en comparer visuellement la brillance : à l'emplacement où l'une de ces tiges obstrue la lumière transmise, on ne voit que la lumière réfléchie, et inversement (figure A2.3). Le cercle divisé sert à repérer l'angle entre le plan de la lame et l'axe du tube, angle qui est le complément à 90° de l'angle d'incidence (et de réflexion) de la lumière avec la normale au plan de la lame.

On mesure d'abord l'angle pour lequel les deux tiges paraissent également lumineuses, c'est-à-dire pour lequel la lumière transmise par la lame est égale à la lumière réfléchie : il correspond à un angle d'incidence de $78^{\circ} 52'$. On recommence en mettant verticalement devant le tube dans le support K, sur le trajet de la lumière, le bloc partiellement biréfringent qui est représenté figure A2.4. La partie non biréfringente est placée dans la partie où une tige obstrue la lumière transmise à travers la lame : comme tout à l'heure, on ne voit que la lumière réfléchie dans la direction de cette tige. La partie biréfringente est placée dans la partie où l'autre tige obstrue la lumière réfléchie par la lame : cette fois, cette tige paraît double et on voit dans la direction de chacune de ses images la moitié de la lumière transmise. On oriente le tube de manière à ce que les tiges paraissent également brillantes : on trouve ainsi que la lumière réfléchie est la moitié de la lumière transmise pour un angle d'incidence de $72^{\circ} 43'$ (une astuce utilisant une lame biréfringente placée devant le bloc permet de s'affranchir des problèmes liés à la polarisation de la lumière par la lame de verre). Avec deux blocs biréfringents en série, la lumière transmise est divisée par quatre et l'égalité est obtenue pour une incidence de $63^{\circ} 22'$, etc. De cette manière, Arago construit une table donnant la fraction de lumière réfléchie pour différentes valeurs de l'angle d'incidence, d'où l'on peut par interpolation déduire cette fraction pour un angle d'incidence arbitraire.

Une fois étalonné, le photomètre peut servir à mesurer la transmission de différents matériaux par la lumière, ou le pouvoir réfléchissant des surfaces. Pour le premier type de mesure, il suffit d'insérer dans une des voies une lame à face parallèles faite du matériau à étudier, et de rétablir l'égalité des faisceaux : on peut déduire le facteur de transmission de la mesure de l'angle avec le cercle divisé. Pour mesurer le pouvoir réflecteur d'un miroir, on cherche l'angle sous lequel la lumière de l'écran réfléchi par le miroir et vue par transmission à travers la lame est égale à la lumière directe réfléchi par cette lame. Arago peut ainsi voir que les miroirs de bronze utilisés pour les télescopes réfléchissent moins de la moitié de la lumière incidente.

Le principe des expériences d'Arago est excellent, et ses mémoires, quoique assez verbeux, sont des modèles de rigueur et de clarté. Pourtant les résultats d'Arago sont médiocres, pas meilleurs que ceux obtenus précédemment

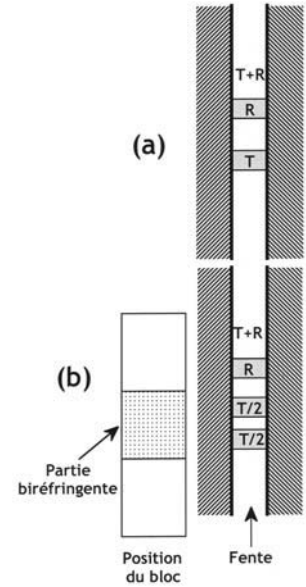


Figure A2.3. Ce que l'observateur voit dans la fente du photomètre. (a) Sans le bloc biréfringent, on observe une partie de la tige supérieure, qui obstrue la lumière T transmise par la lame de verre, et la brillance dans sa direction est due à la lumière réfléchie par la lame, R . On voit aussi la tige inférieure qui obstrue la lumière réfléchie et dans la direction de laquelle la brillance provient de la lumière transmise par la lame, T . Le tout est sur un fond de brillance $T+R$. (b) Avec le bloc biréfringent (dessiné à gauche de sa position réelle), on observe la tige supérieure comme précédemment, mais l'image de la tige inférieure est dédoublée et la brillance dans la direction de chacune des moitiés est $T/2$.

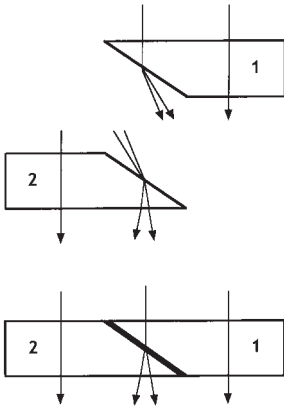


Figure A2.4. Principe du bloc biréfringent utilisé avec le photomètre d'Arago. Chacun des deux morceaux 1 et 2 de ce bloc est fait d'une plaque de quartz à faces parallèles, prélevée parallèlement à l'axe optique et taillée en biseau comme indiqué. La lumière, qui arrive du haut dans les figures, traverse sans double réfraction sensible la partie où les deux surfaces sont parallèles. Dans la partie biseautée, la double réfraction est apparente mais les images sont irisées en raison de la dispersion du prisme ainsi constitué. Pour l'annuler, Arago accole tête-bêche une autre plaque semblable et colle les deux faces obliques avec de l'essence de térébenthine, qui a le même indice de réfraction que le quartz. La séparation des images est doublée et les irisations disparaissent. On obtient ainsi un bloc présentant de la double réfraction en son milieu mais pas aux extrémités, avec l'avantage

par Lambert ! Il est vrai qu'Arago, dont la vue est devenue très faible, ne peut plus faire les mesures lui-même. La figure A2.5 montre ce que Lambert et lui ont obtenu, par comparaison avec la formule établie par Fresnel concernant la réflexion vitreuse (voir le chapitre 3). Arago promet « *que les comparaisons que l'on réclame entre la théorie et l'expérience formeront un chapitre à part* », mais ces comparaisons ne verront jamais le jour. C'est dommage, car Arago connaît certainement la formule de Fresnel et aurait pu se rendre compte de la médiocrité des mesures. Celles-ci affecteront malheureusement le travail d'Arago sur la réflexion par des surfaces métalliques, dont nous ne parlerons pas ici. Mais elles n'ont heureusement aucune influence sur les étapes suivantes de sa photométrie, qui n'utilisent que les mesures dans la bonne partie de la courbe de la figure A2.5.

Deuxième étape : la loi du cosinus carré

La deuxième étape de la photométrie d'Arago consiste à étudier comment l'intensité lumineuse d'une lumière entièrement polarisée est atténuée par un analyseur en fonction de l'angle θ entre les directions de polarisation de la lumière et de l'analyseur (voir figure 3.13). On suspecte que l'atténuation est proportionnelle au carré du cosinus de θ , (loi du cosinus carré) : mais il faut la vérifier. C'est ce qu'Arago va faire en utilisant son polariscope-polarimètre (figure 3.21).

Pour vérifier cette loi, Arago étudie d'abord la lumière partiellement polarisée qui est réfléchiée et transmise par une lame de verre. Il fait tomber la lumière sous une incidence voisine de 73° (figure A2.6, montage 1) ; les mesures avec son photomètre, qui sont bonnes pour ces incidences, montrent que l'intensité réfléchiée est alors la moitié de l'intensité transmise I . Si p est le taux de polarisation de la lumière réfléchiée (rapport de l'intensité polarisée à l'intensité totale), l'intensité polarisée réfléchiée est donc $pI/2$. Or Arago a vérifié par ailleurs que l'intensité de la partie polarisée du rayonnement transmis est égale à celle de la partie polarisée réfléchiée^a ; le taux de polarisation de la lumière transmise est donc $(pI/2)/I = p/2$. Arago examine

^a On appelle quelquefois cette propriété la *loi d'Arago*.

la lumière réfléchiée et la lumière transmise au moyen de son polariscope. Pour mesurer leur taux de polarisation, il place devant son polariscope une pile de glaces, formée de plusieurs lames de verre parallèles séparées les unes des autres par de minces cales, le transformant ainsi en polarimètre. Comme nous l'avons vu au chapitre 3, cette pile inclinée convenablement peut égaliser les intensités des composantes polarisées parallèlement et perpendiculairement à la pile. Pour obtenir ce résultat, qu'il vérifie avec le polariscope, Arago doit incliner la pile de l'angle α pour la lumière réfléchiée, et de l'angle α' pour la lumière transmise.

Il réalise ensuite le montage 2. Une lumière totalement polarisée d'intensité F provenant d'une source étendue tombe sur une lame de quartz taillée parallèlement à l'axe optique, donc biréfringente, qui la décompose en deux faisceaux polarisés perpendiculairement, dont l'intensité respective doit être $F\cos^2\theta$ et $F\sin^2\theta$ si la loi en cosinus carré est vraie (θ est l'angle entre la direction de la polarisation et l'axe optique de la lame). Ces deux faisceaux étant en fait superposés, l'intensité polarisée est la différence entre ces deux quantités, soit $F(\cos^2\theta - \sin^2\theta) = F\cos 2\theta$. Arago

supplémentaire que les pertes de lumière par réflexion sur la face d'entrée et celle de sortie sont partout les mêmes : le bloc divise donc exactement l'intensité lumineuse par deux dans sa partie médiane, par rapport à l'intensité transmise dans ses parties extérieures. L'angle de double réfraction est exagéré sur ces figures.

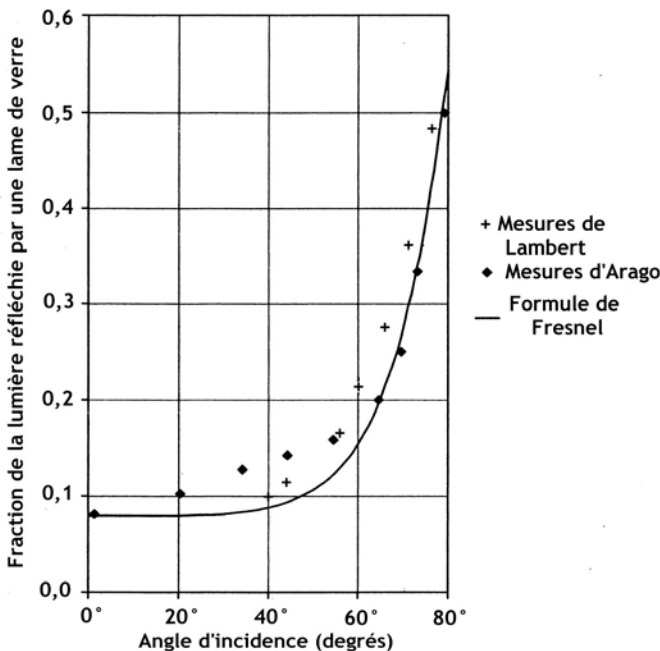
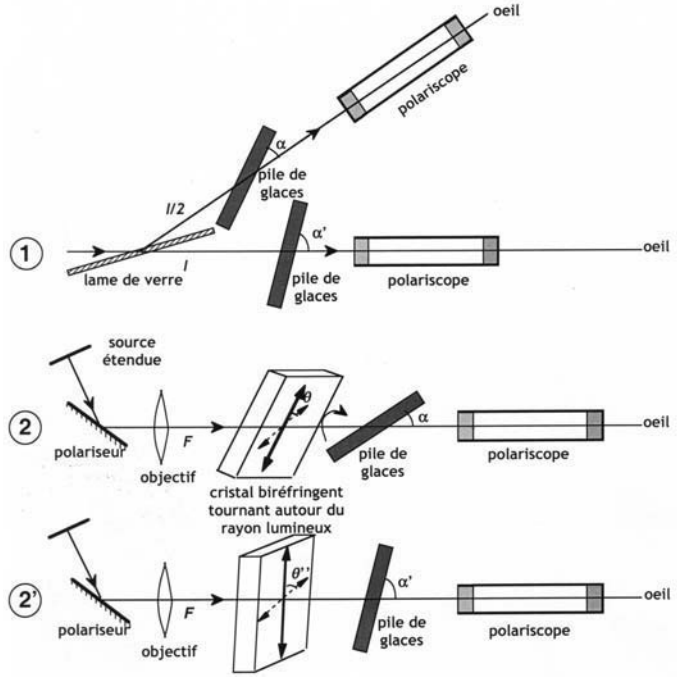


Figure A2.5. Mesures par Lambert et par Arago de la fraction de la lumière réfléchiée par une lame de verre, c'est-à-dire du rapport entre l'intensité réfléchiée et l'intensité incidente. On voit que les mesures de Lambert sont assez médiocres partout, et que les mesures d'Arago ne sont bonnes que pour des incidences assez obliques, supérieures à 60°.

Figure A2.6. Les montages d'Arago pour vérifier la loi du cosinus carré. Explications dans le texte. Le trait plein fléché aux deux extrémités représente l'axe optique du cristal biréfringent, et celui en trait interrompu est la direction de la polarisation incidente.



examine cette lumière avec son polariscope à travers une pile de glaces ayant l'inclinaison α déterminée ci-dessus, et tourne le cristal biréfringent pour régler l'angle θ jusqu'à ce que la polarisation soit annulée. Il recommence (montage 2') en donnant cette fois l'inclinaison α' à la pile de glaces, obtenant alors l'angle θ' . Si la loi du carré du cosinus est exacte, on doit avoir $\cos 2\theta / \cos 2\theta' = p / (p/2) = 2$, ce qu'Arago vérifie (il trouve en fait 1,96). Il recommence pour d'autres valeurs de l'inclinaison de la lame de verre, et vérifie ainsi la loi pour plusieurs valeurs de θ .

Appendice 3

Instructions concernant la physique du globe

Les instructions parues dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, Vol. 1 (1835), p. 380-410¹, et dont nous donnons ici des extraits, sont un véritable compendium des connaissances et des idées d'Arago en matière de physique du globe, et fixent un cadre pour les observations scientifiques lors des expéditions maritimes. Cependant, ce ne sont pas les premières instructions : la Royal Society de Londres a demandé à un « éminent mathématicien et philosophe, Master Rooke » de préparer des instructions pour les navigateurs se rendant aux Indes orientales et occidentales². Lues dans la séance du 8 janvier 1666, elles contiennent déjà des éléments qui dépassent l'intérêt direct de la navigation. Il nous a paru intéressant d'en donner des extraits à titre de comparaison, dans une traduction d'époque dont nous conservons l'orthographe.

Les instructions anglaises de 1666

Le dessein de la Société Royale estant selon son établissement de s'attacher à la recherche de la nature^a, & conformément aux observations faites sur divers phenomenes & les effets que l'on en a remarquez, de composer une histoire naturelle qui puisse dorenavant servir de fondement pour établir une Philosophie solide & utile : Elle a de temps en temps donné ordre à divers de ses membres, non seulement de travailler à la recherche des choses remarquables qui se rencontrent dans les pays esloignez ; mais encore de dresser quelques instructions pour les particuliers qui pouvoient avoir la mesme curiosité. C'est pour cet effet que

^a La traduction littérale est : « d'étudier la *Nature* plutôt que les *Livres* », ce qui est nouveau à cette époque.

considerant les grands avantages qu'on pourroit tirer des voïages qui se feront à l'avenir dans toutes les parties du monde^b, on avoit cy devant choisi M. Rooke & on l'avoit chargé du soin de dresser quelque advis pour ceux qui vont par la mer aux Indes Orientales ou Occidentales, afin de les rendre plus capables de faire des remarques qui peuvent contribuer à l'accomplissement de leur dessein. [...] On a jugé à propos de mettre [son mémoire] en lumière, & d'en donner à tous les Mariniers une coppie en la forme qui suit. D'observer la declinaison de la boussole, ou la variation de l'éguille au Meridien, marquant le plus exactement qu'il sera possible, l'endroit où l'observation aura esté faite, & la methode dont on se sera servy pour la faire.

De porter avec soy des éguilles bien trempées et bien aimantées, & de remarquer de la mesme maniere l'inclination de l'éguille.

D'observer soigneusement le flus & reflux de la mer dans tout autant d'endroits qu'ils le pourront faire. [...]

De faire des plans et des descriptions de l'aspect des costes, des promontoires, des isles & des ports, marquant les approches & les esloignements le plus exactement qu'il est possible.

De sonder & de remarquer la profondeur des costes, des ports, & des autres semblables endroits proches des rivages, selon qu'ils jugeront à propos.

De tascher de connoitre la nature de la terre qui est au fonds de la mer, & de la sonder de toutes les manieres, pour sçavoir si c'est argile, sable, ou roc.

De faire un memoire de tous les changemens des vents & du temps qui se font à toutes les heures du jour & de la nuit [...]. Mais sur tout d'apporter un grand soin à remarquer les vens reglez [les alizés], dans quel degré de longitude & de latitude ils commencent d'abord, ou quand ils cessent, ou changent & deviennent plus forts ou plus foibles, & de combien. [...]

D'observer & de mettre en escrit tous les meteores extraordinaires, tels que sont les esclairs, les tonneres, les cometes, les feux folets. [...]

De porter avec soy de bonnes balances & des phioles qui tiennent environ une pinte, & qui ayent le col fort estroit,

^b Ici la traduction dévie de l'original pour des raisons nationalistes. La traduction littérale est : « *considérant l'avantage que l'Angleterre a de faire des voyages dans toutes les parties du monde* ».

que l'on emplira d'eau de la mer en differens degrez de latitude, ainsi qu'on le jugera à propos ; & de remarquer soigneusement la pesanteur de la phiole pleine d'eau prise en chaque temps, & sur tout le degré de latitude & le jour du mois [et ceci aussi bien pour l'eau en surface qu'en profondeur³].

Suit un appendice avec une planche⁴ qui décrit deux appareils océanographiques construits par Robert Hooke : un système de sondage, et un dispositif rudimentaire pour ramener à la surface des échantillons d'eau profonde. La planche contient aussi la représentation d'une boussole d'inclinaison, d'un anémomètre et d'une sorte de pèse-liqueur.

Les instructions d'Arago

(Introduction)

Lorsque l'Académie nous chargea, il y a quinze jours, de rédiger une sorte de programme dans lequel se trouveraient réunies les questions variées de physique du globe qu'il pourrait paraître convenable de recommander à MM. les officiers de la Bonite, nous n'aperçûmes pas d'abord toutes les difficultés de cette mission. Ces difficultés n'étaient que trop réelles. Nous avouerons même sans détour que nous ne croyons pas les avoir surmontées. Au reste, nous trouverons notre excuse et dans la brièveté du temps qui nous était accordé, et surtout dans l'obligation, à laquelle il nous eût été impossible de nous soustraire, d'en consacrer la plus grande partie à la vérification et aux épreuves des nombreux et excellens instrumens dont nos jeunes compatriotes vont être pourvus. [...]

Signaler les expériences à faire sans indiquer par aucune explication les lacunes de la science qu'elles sont destinées à remplir, eût été sans doute le plus court ; mais, tout balancé, il nous a paru préférable d'accompagner l'énoncé de chaque problème de développemens qui en montrassent l'importance. Par là, les officiers de la Bonite se trouveront, en quelque sorte, associés dès ce moment aux investigations savantes que leurs recherches feront surgir ; par là, aussi, leur courage, leur persévérance, leur zèle, recevront une nouvelle et vive excitation.

Phénomènes météorologiques

En météorologie, on doit savoir se résigner à faire des observations qui, pour le moment, peuvent ne conduire à aucune conséquence saillante ; il faut, en effet, songer à pourvoir nos successeurs de termes de comparaison dont nous manquons nous-mêmes ; il faut leur préparer les moyens de résoudre une foule d'importantes questions qu'il ne nous est pas permis d'aborder, parce que l'antiquité ne possédait ni baromètre ni thermomètre.

La terre, sous le rapport de la température, est-elle arrivée à un état permanent ? La solution de cette question capitale, semble ne devoir exiger que la comparaison directe, immédiate, des températures moyennes du même lieu, prises à deux époques éloignées. [...] [Le moyen] consiste à observer la température en pleine mer, très loin des continents.

De vives discussions se sont élevées entre les météorologistes, au sujet des effets calorifiques que les rayons solaires peuvent produire par voie d'absorption dans différents pays. Les uns citent des observations recueillies vers le cercle arctique, et dont semblerait résulter cette étrange conclusion : le soleil échauffe plus fortement dans les hautes que dans les basses latitudes. D'autres rejettent ce résultat ou prétendent, du moins, qu'il n'est pas prouvé : les observations équatoriales prises pour terme de comparaison, ne leur semblent pas assez nombreuses ; d'ailleurs, ils trouvent qu'elles n'ont pas été faites dans des circonstances favorables. Cette recherche [nécessite] deux thermomètres dont les récipients [...] absorbent inégalement les rayons solaires. [...] Après s'être muni de deux thermomètres ordinaires et tout pareils, on recouvre la boule du premier d'une certaine épaisseur de laine blanche, et celle du second d'une épaisseur égale de laine noire. Ces deux instruments exposés au soleil, l'un à côté de l'autre, ne marqueront jamais le même degré : le thermomètre noir montera davantage. La question consistera donc à déterminer si la différence des deux indications est plus petite à l'équateur qu'au cap Horn. Il est bien entendu que des observations comparatives de cette nature, doivent être faites à des hauteurs égales du soleil, et par le temps le plus serein possible. Les expériences que nous venons de proposer doivent, toutes choses d'ailleurs égales, donner la mesure de la diaphanéité [transparence] de l'atmosphère. Cette diaphanéité peut être appréciée d'une manière en quelque sorte inverse et non moins intéressante, par des observations de rayonnement nocturne.

On sait, depuis un demi-siècle, qu'un thermomètre placé, par une ciel serein, sur l'herbe d'un pré, marque 6°, 7° et même 8° centigrades de moins qu'un thermomètre tout semblable suspendu dans l'air à quelque élévation au-dessus du sol ; mais ce n'est que depuis peu d'années qu'on a trouvé l'explication de ce phénomène ; c'est depuis 1817 seulement, que Wells a constaté, à l'aide d'expériences importantes et variées de mille manières, que cette inégalité de température a pour cause la faible vertu rayonnante d'un ciel serein.

Un écran, placé entre des corps solides quelconques et le ciel, empêche qu'ils ne se refroidissent, parce que cet écran intercepte leurs communications rayonnantes avec les régions glacées du firmament. Les nuages agissent de la même manière ; ils tiennent lieu d'écran. Mais, si nous appelons nuage toute vapeur qui intercepte quelques rayons solaires venant de haut en bas, ou quelques rayons calorifiques allant de la terre vers les espaces célestes, personne ne pourra dire que l'atmosphère en soit jamais dépouillée. Il n'y aura de différence que du plus au moins.

Eh bien ! ces différences, quelque légères qu'elles soient, pourront être indiquées par les valeurs des refroidissements nocturnes des corps solides. [...] Pour faire ces expériences dans des conditions avantageuses, il faut évidemment choisir les corps qui se refroidissent le plus par rayonnement. D'après les recherches de Wells, c'est le duvet de cygne que nous indiquerons. Un thermomètre, dont la boule devra être entourée de ce duvet, sera placé dans un lieu d'où l'on aperçoit à peu près tout l'horizon. [...] Un autre thermomètre à boule nue sera suspendu dans l'air. [...] Un écran le garantira de tout rayonnement dans l'espace. [...] Nous n'avons pas besoin, sans doute, de faire ressortir toute l'utilité qu'auraient ces mêmes expériences, si on les répétait sur une très haute montagne telle que le Mowna-Roa ou la Mowna-Kaah des îles Sandwich [Mauna Loa et Mauna Kea, sur l'île d'Hawaï].

Dans nos climats, la couche terrestre qui n'éprouve ni des variations de température diurnes, ni des variations de température annuelles, se trouve située à une fort grande distance de la surface du sol. Il n'en est pas de même dans les régions équatoriales ; là, d'après les observations de M. Boussingault, déjà il suffit de descendre un thermomètre à la simple profondeur de 1/3 de mètre, pour qu'il marque constamment la même température. Nos voyageurs

pourront donc [ainsi] déterminer très exactement la température moyenne de tous les lieux où ils stationneront entre les tropiques.

Nous insisterons aussi, d'une manière spéciale, sur les températures des sources thermales.

Si la relâche de la Bonite aux îles Sandwich doit avoir quelque durée, il pourra paraître convenable de mesurer le Mowna-Roa barométriquement. Les observations thermométriques faites au sommet de cette montagne isolée, comparées à celles du rivage de la mer, donneront, sur le décroissement de la température atmosphérique et sur la limite des neiges perpétuelles, des résultats que l'éloignement des continents rendra particulièrement précieux^c.

L'officier qui gravira le Mowna-Roa ne devra pas négliger de noter, à chacune de ses stations, la direction du vent. [Arago renvoie à un autre passage de ses recommandations, cité plus loin, où l'on voit qu'il s'agit de constater éventuellement le « vent supérieur » qui est dirigé en sens contraire des alizés à basse altitude.]

Baromètre

Il y a peu d'années, on se serait récrié contre toute idée d'une différence permanente entre les hauteurs barométriques correspondantes aux différentes régions du globe, au niveau de la mer. Aujourd'hui de telles différences sont regardées non-seulement comme possibles, mais encore comme probables. [...] Il existe de nombreux mémoires sur la variation diurne du baromètre ; ce phénomène a été étudié depuis l'équateur jusqu'aux régions les plus voisines des pôles ; au niveau de la mer, sur les immenses plateaux de l'Amérique, sur des sommets isolés des hautes montagnes, et néanmoins la cause en est restée jusqu'ici ignorée.

Pluie

Si il y a de la grêle, que l'on vienne à prouver que les grêlons se sont formés dans une région où la température était supérieure au terme de la congélation de l'eau, et l'on aura enrichi la science d'un résultat précieux auquel la théorie à venir de la grêle devra satisfaire.

^c Il n'y a pas de neiges éternelles au sommet du Mauna Loa.

Quelquefois, entre les tropiques, il pleut, par l'atmosphère la plus pure, par un ciel du plus bel azur ! Les gouttes ne sont pas très serrées ; mais elles surpassent en grosseur les plus larges gouttes de pluie d'orage de nos climats. Le fait est certain ; nous en avons pour garant et M. de Humboldt, qui l'a observé à l'intérieur des terres, et M. le capitaine Beechey, qui en a été témoin en pleine mer. [...] Les grosses gouttes n'ont-elles pas été dans les plus hautes régions de l'atmosphère, d'abord, de très petites parcelles de glace excessivement froides ; ensuite, plus bas, par voie d'agglomération, de gros glaçons ; plus bas encore, des glaçons fondus et de l'eau. [...] Ces conjectures ne sont consignées ici [...] que pour exciter nos jeunes voyageurs à chercher avec soin si pendant ces singulières pluies, les régions du ciel d'où elles tombent n'offriraient pas quelques traces de halo. Si ces traces s'aperçoivent, quelques légères qu'elles fussent, l'existence de cristaux de glace dans les hautes régions de l'air serait démontrée.

Magnétisme terrestre

L'itinéraire de l'expédition ne permet pas de supposer que la Bonite puisse relâcher ou du moins séjourner quelque temps, dans des points situés entre l'équateur terrestre et l'équateur magnétique. [...] Sans cela, nous eussions recommandé d'une manière particulière, d'y établir solidement, et loin de toute masse ferrugineuse, le bel instrument de M. Gambey, et de suivre les oscillations de l'aiguille avec un soin scrupuleux.

Dans une longue note en bas de page, on voit qu'il s'agit d'observer les variations diurnes de la déclinaison, dont Arago rappelle les règles générales ; comme il y a renversement entre les deux hémisphères, il doit y avoir une ligne dans les régions équatoriales où il n'y a pas de variation diurne, mais où est-elle ? Il faudrait des observations prolongées en différents lieux, dont Arago regrette beaucoup qu'elles ne puissent avoir lieu. Il faudrait faire aussi des observations pour tracer les lignes d'égale inclinaison magnétique.

Les observations d'intensité ne datent que des voyages de d'Entrecasteaux et de M. de Humboldt ; et cependant elles ont déjà jeté de vives lumières sur la question si compliquée, et en même temps si intéressante, du magnétisme terrestre ;

et cependant à chaque pas le théoricien est arrêté par le manque de mesures exactes.

En raison de controverses sur la variation éventuelle de la « *force magnétique* » avec l'altitude, Arago demande de nouvelles observations au Mauna Kea et si possible, au Tacora près d'Arica au Chili. Il dit qu'il serait utile d'observer aussi la variation éventuelle de l'inclinaison avec l'altitude, mais cela risque d'être très difficile.

Météores lumineux

Étoiles filantes

Leur parallaxe les a déjà placées beaucoup plus haut que, dans les théories adoptées, les limites sensibles de notre atmosphère ne sembleraient le comporter. En cherchant la direction suivant laquelle les étoiles filantes se meuvent le plus habituellement, on a reconnu, par une autre voie, que si elles s'enflamment dans notre atmosphère, elles n'y prennent pas du moins naissance ; qu'elles viennent du dehors. Cette direction la plus habituelle des étoiles filantes semble diamétralement opposée au mouvement de translation de la terre dans son orbite !

Il serait désirable que ce résultat fût établi sur la discussion d'une grande quantité d'observations. [...] Pour que nos jeunes compatriotes s'y attachent, il nous suffira de leur faire remarquer combien il serait piquant d'établir que la Terre est une planète par des preuves puisées dans des phénomènes tels que les étoiles filantes, dont l'inconstance était devenue proverbiale. Nous ajouterions encore, s'il était nécessaire, qu'on n'entrevoit guère aujourd'hui la possibilité d'expliquer l'étonnante apparition de bolides, observée en Amérique dans la nuit du 12 au 13 novembre 1833 [venant d'un point proche de γ Leonis], si ce n'est en supposant qu'outre les grandes planètes (et dans ce nombre nous comprenons même Cérès, Pallas, Junon et Vesta), il circule autour du Soleil des milliards de petits corps qui ne deviennent visibles qu'au moment où ils pénètrent dans notre atmosphère et s'y enflamment ; que ces astéroïdes (pour nous servir d'une expression d'Herschel) se meuvent en quelque sorte par groupes ; qu'il en existe cependant d'isolés ; et que l'observation assidue des étoiles filantes sera, à tout jamais, le seul moyen de nous éclairer sur ces curieux phénomènes.

Lumière zodiacale^d

Il ne serait peut-être pas impossible de trouver dès ce moment, dans les observations de Fatio, comparées à celles de Cassini I, [qui a le premier étudié ce phénomène et ses variations temporelles], la preuve que des variations atmosphériques ne sauraient suffire à l'explication des phénomènes signalés par l'astronome de Paris ; quant à l'objection tirée de l'immensité de l'espace dans lequel les changemens physiques devraient s'opérer, elle a perdu toute sa gravité depuis les phénomènes du même genre dont la comète de Halley vient de nous rendre témoins.

Aurores boréales

Il est assez bien établi, maintenant, que les aurores polaires ne sont pas moins fréquentes dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord. Tout porte à penser [qu'elles] suivent les mêmes lois. Si une aurore australe se montrait aux officiers de la Bonite sous la forme d'un arc, il serait important de noter exactement les azimuths des points d'intersection de cet arc avec l'horizon, et à leur défaut, l'azimuth du point le plus élevé. En Europe, ce point le plus élevé paraît toujours situé dans le méridien magnétique du lieu où se trouve l'observateur.

De nombreuses recherches, faites à Paris, ont prouvé que toutes les aurores boréales [...] altèrent fortement la déclinaison de l'aiguille aimantée. Qui oserait donc arguer du grand éloignement des aurores australes, pour affirmer qu'aucune d'elles ne peut porter du trouble dans le magnétisme de notre hémisphère ? [...] Des dispositions sont déjà prises afin que pendant toute la durée de la circumnavigation de la Bonite, les observations magnétiques soient faites à Paris à des époques fort rapprochées et de manière qu'aucune perturbation ne puisse passer inaperçue.

Arc-en-ciel

L'explication de l'arc-en-ciel peut être regardée comme une des plus belles découvertes de Descartes ; cette explication,

^d Rappelons que la lumière zodiacale est une lueur très étendue que l'on peut voir le long de l'écliptique après le coucher du Soleil ou avant son lever, si les conditions sont favorables ; elle provient de la diffusion de la lumière solaire par les poussières du milieu interplanétaire.

toutefois, même après les développemens que Newton lui a donnés, n'est pas complète. Quand on regarde attentivement ce magnifique phénomène, on aperçoit sous le rouge de l'arc intérieur, plusieurs séries de vert et de pourpre formant des arcs étroits, contigus, bien définis et parfaitement concentriques à l'arc principal. De ces arcs supplémentaires (car c'est le nom qu'on leur a donné), la théorie de Descartes et de Newton n'en parle point ; elle ne saurait même s'y appliquer.

Les arcs supplémentaires paraissent être en effet un effet d'interférences lumineuses. Ces interférences ne peuvent être engendrées que par des gouttes d'eau d'une certaine petitesse [qui] satisfassent, du moins pour le plus grand nombre, à celle d'une égalité de dimensions presque mathématique.

Arago dit que ces arcs surnuméraires sont peu visibles dans les régions basses de l'arc-en-ciel lorsque le soleil est bas sur l'horizon, ce qui montre que les gouttes grossissent en descendant. Que se passe-t-il dans les régions tropicales ?

Halos

Dans les latitudes élevées, dans les parages du cap Horn, par exemple, le soleil et la lune paraissent souvent entourés d'un ou de deux cercles lumineux, que les météorologistes appellent des halos. Le rayon du plus petit de ces cercles est d'environ 22° ; le rayon du plus grand diffère à peine de 46° . La première de ces dimensions angulaires est à peu de chose près la déviation minimum que la lumière éprouve en traversant un prisme de glace de 60° ; l'autre serait donnée par deux prismes de 60° ou par un seul prisme de 90° .

Il semblait donc naturel de chercher, avec Mariotte, la cause des halos, dans des rayons réfractés par des cristaux flottans de neige, lesquels présentent ordinairement, comme tout le monde sait, des angles de 60 et de 90° .

Cette théorie, au surplus, a reçu une nouvelle vraisemblance, depuis qu'à l'aide de la polarisation chromatique, on est parvenu à distinguer la lumière réfractée de la lumière réfléchie. Ce sont, en effet, les couleurs de la première de ces lumières que donnent les rayons polarisés des halos. Que peut-il donc rester à éclaircir dans ce phénomène ? Le voici :

D'après la théorie, le diamètre horizontal d'un halo et le diamètre vertical devraient avoir les mêmes dimensions angulaires ; or, on assure que ces diamètres sont quelquefois notablement inégaux.

Des mesures peuvent seules constater un pareil fait ; car si, par hasard, on n'avait jugé de l'inégalité en question qu'à l'oeil nu, les causes d'illusions ne manqueraient pas pour expliquer comment le physicien le plus exercé aurait pu se tromper. [...] Nous pouvons donc, sans scrupule, recommander à MM. les officiers de la Bonite, d'appliquer les cercles [de Borda] dont ils seront tous pourvus, à la détermination des dimensions de tous les halos qui leur paraîtraient elliptiques.

Vents

Vents alisés

D'après l'explication des vents alisés la plus généralement adoptée, il doit y avoir constamment, entre les tropiques, un vent supérieur dirigé en sens contraire de celui qui souffle à la surface du globe. On a déjà recueilli diverses preuves de l'existence de ce contre-courant. L'observation assidue des nuages élevés, de ceux particulièrement qu'on appelle pommelés, doit fournir des indications précieuses dont la météorologie tirerait parti.

L'époque, la force et l'étendue des moussons, forment, enfin, un sujet d'étude dans lequel, malgré une foule d'importants travaux, il y a encore à glaner.

Phénomènes de la mer

Courans

Tout le monde connaît les travaux de Franklin, de Blagden, de Jonathan Williams, de M. de Humboldt, du capitaine Sabine, sur le Gulph-Stream. [...] Le long de la côte d'Amérique, la position, la largeur et la température du Gulph-Stream, ont été assez bien déterminées sous chaque latitude pour qu'on ait pu, sans charlatanisme, publier un ouvrage avec le titre de Navigation thermométrique (Thermometrical Navigation), à l'usage des marins qui atterrissent sur ces parages. Il s'en faut de beaucoup que la branche rétrograde [qui redescend parallèlement à la côte du Portugal] soit connue avec la même certitude. Son excès de température est presque effacé quand elle arrive par le parallèle de Gibraltar. Il vient d'être question d'un courant d'eau chaude ; nos navigateurs rencontreront, au contraire, un courant d'eau

froide, le long des côtes du Chili et du Pérou, [...] signalé, pour la première fois, quant à sa température, par M. de Humboldt.

Le major Rennel a décrit, avec une minutieuse attention, le courant qui venant de la côte sud-est de l'Afrique, longe le banc des Agullas. Ce courant, d'après les observations de M. John Davy, a une température de 4 à 5° centigrades supérieure à celle des mers voisines. Cet excès de température mérite d'autant plus de fixer l'attention des navigateurs, qu'on a cru y trouver la cause immédiate de l'enveloppe de vapeurs appelée la nappe qui se montre toujours au sommet de la montagne de la Table [au Cap de Bonne Espérance] quand le vent souffle du Sud-Est.

Nous croyons que la nouvelle expédition agira sagement, si elle se munit de thermomètres et d'appareils de sondage qui pourront lui permettre de faire descendre ces instrumens en toute sûreté, jusqu'aux plus grandes profondeurs de l'Océan. Il n'est guère douteux aujourd'hui que les eaux froides inférieures des régions équinoxiales n'y soient amenées par des courans sous-marins venant des zones polaires ; mais la solution même complète de ce point de théorie, serait loin d'enlever tout intérêt aux observations que nous recommandons ici. Qui ne voit, par exemple, que la profondeur où l'on trouvera le maximum de froid, nous dirons plus, tel ou tel autre degré de température, doit dépendre, sous chaque parallèle, d'une manière assez directe de la profondeur totale de l'Océan, pour qu'il soit permis d'espérer que cette dernière quantité se déduira tôt ou tard de la valeur des sondes thermométriques^e.

Jonathan Williams reconnut que l'eau est plus froide sur les bas-fonds qu'en pleine mer. MM. de Humboldt et John Davy confirmèrent la découverte de l'observateur américain. Sir Humphry Davy [le frère de John] attribuait ce curieux phénomène, non à des courans sous-marins qui arrêtés dans leur marche remonteraient le long des accores du banc et glisseraient ensuite à sa surface, mais au rayonnement. Par voie de rayonnement, surtout quand le ciel est serein, les couches supérieures de l'Océan doivent certainement se refroidir beaucoup ; mais tout refroidissement, si ce n'est dans les régions polaires où la mer est à peu près de 0° de température, amène une augmentation de densité et un mouvement descendant des couches refroidies. Supposons

^e Ceci paraît bien optimiste.

un océan sans fond ; les couches en question tombent jusqu'à une grande distance de la surface et doivent en modifier très peu la température ; mais sur un haut-fond, lorsque les mêmes causes opèrent, les couches refroidies s'accumulent et leur influence peut devenir très sensible.

Hauteur des vagues

Les jeunes officiers dont se compose l'état-major de la Bonite, seront probablement bien surpris, si nous les avertissons qu'aucun de leurs devanciers n'a résolu d'une manière complète les questions suivantes : Quelle est la plus grande hauteur des vagues pendant les tempêtes ? quelle est leur plus grande dimension transversale ? quelle est leur vitesse de propagation ? [...]

Arago suggère d'utiliser un *secteur de dépression* (*deep sector*) permettant de voir en même temps deux points opposés, et de voir à quelle hauteur en grim pant sur le mât on voit l'horizon lorsque le navire est au creux de la vague, et si l'on ne peut pas utiliser cet instrument de voir à quelle hauteur on voit l'horizon quand le navire est au creux et non incliné. Les deux autres points ne présentent pas de difficulté.

Visibilité des écueils

Arago recommande de regarder la mer depuis le haut du mât à travers une lame de tourmaline, qui est un polariseur, de façon à diminuer la lumière réfléchie, qui est entièrement polarisée si la surface est vue sous un angle de 37°. On augmente ainsi le contraste avec l'écueil.

[Ainsi] MM. les officiers de la Bonite [...] doteront probablement la navigation d'un moyen d'observation qui pourra prévenir maint naufrage ; en introduisant enfin la polarisation dans l'art nautique, ils montreront, par un nouvel exemple, à quoi s'exposent ceux qui accueillent sans cesse les expériences et les théories sans applications actuelles, d'un dédaigneux à quoi bon ?

Trombes

L'électricité joue-t-elle quelque rôle dans la production des trombes ? [...]

Dépressions de l'horizon

Arago s'intéresse ici aux anomalies de la réfraction.

En discutant avec soin toutes les observations de MM. Gautier, Hall et Parry, on a reconnu que l'erreur de la dépression calculée n'est positive, que cette dépression ne surpasse celle qu'on observe, qu'autant que la température de l'air est supérieure à celle de l'eau. Quant aux erreurs négatives, elles se sont présentées indistinctement dans tous les états thermométriques comparatifs de la mer et de l'atmosphère.

Observations diverses

Soulèvement de la côte du Chili

Soulèvement supposé lié aux tremblements de terre, à étudier à partir des coquillages, du lac de Quintero communiquant avec la mer, etc.

Tremblemens de terre

Hauteur des principaux pics et de la limite des neiges perpétuelles dans la Cordillère du Chili

Les principales sommités de la Cordillère du Chili n'ont pas été exactement mesurées. On rapporte que, tout récemment, une opération trigonométrique de M. le capitaine Fitzroy, a donné à la montagne de l'Acoucagua [sic], l'énorme hauteur de 23 000 pieds anglais. Cette opération mériterait d'être vérifiée. On pourrait, en même temps, mesurer le Nevada de Tupungato qui domine la ville de Santiago. Au surplus, la hauteur de la limite inférieure des neiges perpétuelles, est encore plus intéressante à connaître que celle des sommités des montagnes. Nous consignons ici cette remarque afin que s'il fallait opter on n'hésitât pas sur le choix.

En fin de texte, on trouve la mention suivante :

Sur la proposition de M. Biot, l'Académie a décidé que MM. Les officiers de la Bonite seraient invités à puiser de

l'eau dans l'Océan à de très grandes profondeurs, et à examiner la composition chimique de l'air que cette eau peut contenir en dissolution^f.

^f Biot a effectivement mis au point une « bouteille à renversement » permettant de récolter un échantillon d'eau de mer à grande profondeur.

Notes

Les ouvrages figurant dans la Bibliographie à la fin de ce livre sont simplement mentionnés par le nom de l'auteur suivi de la date de publication entre parenthèses.

Abréviations

AP : *Arago, Astronomie populaire.*

OC : *Arago, Œuvres complètes.*

ACP : *Annales de chimie et de physique.*

Annu. BdL : *Annuaire du Bureau des longitudes.*

BUG : *Bibliothèque universelle de Genève.*

CRAS : *Comptes rendus de l'Académie des sciences.*

CdT : *Connaissance des temps.*

Mém. AdS : Mémoires de l'Académie des sciences, et (avant la Révolution) Histoire de l'Académie Royale des sciences.

Mém. Inst. : Mémoires de l'Institut des sciences, lettres et arts, Sciences mathématiques et physiques (de la Révolution à 1815).

Phil. Trans. : Philosophical Transactions of the Royal Society of London.

Introduction

¹ Un ouvrage récent est consacré principalement à son activité politique et à celle de sa famille : Sarda (2000).

² Fabry, Ch. (1938) in « La vie et l'œuvre scientifique d'Augustin Fresnel », article inséré dans *La vie et l'œuvre de Charles Fabry, Œuvres choisies publiées à l'occasion du jubilé scientifique de M. Charles Fabry*, Gauthier-Villars, 1938.

³ Bigourdan (1928-1932).

⁴ Daumas (1987).

Chapitre 1

¹ On trouvera la plupart des renseignements utiles d'ordre historique et administratif sur l'Académie des sciences dans <http://www.academie-sciences.fr> et dans :

Institut de France (1979) *Index bibliographique des membres et correspondants de l'Académie des sciences 1666-1978*, Paris, Gauthier-Villars. Le livre de Tobin (2002) contient de nombreuses informations et une bibliographie sur l'Académie des sciences.

² Pour une biographie de Monge et des détails sur sa triste fin de vie où il a été pourchassé à la Restauration en raison de ses convictions bonapartistes et caché pour quelque temps par Arago à l'Observatoire de Paris, voir Pairault (2000), *Gaspard Monge*, Taillandier, Paris, et la Biographie de Gaspard Monge par Arago, *Mém. AdS*, t. 24, p. I-CLVII, OC t. 2, p. 427-592.

³ Pour la Société philomathique, voir Tobin (2002). Des détails et une bibliographie sur la Société d'Arcueil se trouvent dans Daumas (1987).

⁴ Une histoire détaillée du Bureau des longitudes se trouve dans Bigourdan (1928-1932). Voir aussi Lamy (2006).

⁵ Cassini IV in *Mém. AdS* pour 1788, p. 706-717.

⁶ D'après la CdT et les *Annu. BdL*.

⁷ Voir le site internet de l'École polytechnique <http://www.polytechnique.fr/institution>

⁸ Tobin (2002) p. 164.

⁹ Voir à ce sujet Debyser (2007).

¹⁰ Malouin P.J. in *Mém. AdS* pour 1746, p. 151-186.

¹¹ Lavoisier A.-L. de, Éloge de M. Bergman, in *Mém. AdS* pour 1784, p. 31-47.

¹² Coulomb C. (1788), Sixième mémoire sur l'électricité, in *Mém AdS* pour 1788, p. 617-705.

¹³ Lavoisier (1790) Discours préliminaire, p. 13.

¹⁴ Barral (1853).

¹⁵ De l'utilité des pensions accordées aux savants, aux littérateurs, aux artistes, OC, t. 3 p. 611-624.

¹⁶ Boistel (2007).

¹⁷ *Bulletin des Sciences de la Société Philomathique de Paris*, t. 3 (1811) p. 1-2.

- ¹⁸ Delamétherie J.-C. *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, an VII (1799), 48, p. 3-99 (découverte de 4 nouveaux satellites d'Uranus) ; an IX (1801) 52, p. 3-115 (découverte de l'infrarouge) ; an X (1802), 54, p. 3-85 et an XI (1803), 56, p. 3-92 (nature du Soleil) ; (1809), 68, p. 3-95 (nébuleuses), etc.
- ¹⁹ Herschel W. (1812) *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, 75, p. 121-167.
- ²⁰ Volta A. (1800) *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts* 50, p. 344-354.
- ²¹ Voir par exemple le compte rendu très détaillé de l'ouvrage *Exposition des opérations faites en Laponie, pour la détermination d'un arc de méridien en 1801, 1802 et 1803*, par MM. Ofverbom, Svanberg, Holmquist et Palander, rédigée par M. Svanberg etc. Stockholm, Lindh. 1805, vol. in-8°, dans la *CdT* pour 1808, p. 466-479.
- ²² *ACP* 14 (1820) p. 417-425.
- ²³ *An account of the operations carried on for accomplishing a trigonometrical Survey of England and Wales*, by Captain William Mudge, F. R. S., and M. Isaac Dalby; published by W. Faden, geographer to his Majesty; n° 5 Charing-Cross, London.
- ²⁴ *CdT* pour 1818, p. 243-278. C'est la première année où l'on y trouve des articles anglais en traduction : les relations entre la France et l'Angleterre s'étaient en effet améliorées depuis 1815.
- Paris est malheureusement épuisée, mais on peut accéder au texte sur *gallica*.
- ⁷ *OC*, t. 12, p. 548-553.
- ⁸ Hamy (1908), Lettre XI, p. 29-36.
- ⁹ *Ibid.*, Lettre XXXVII, p. 126-133 (1833).
- ¹⁰ *Ibid.*, note après la Lettre LXX, (1841).
- ¹¹ Il existe de nombreux ouvrages sur Humboldt. Nous recommandons celui de Botting (1988), qui insiste sur l'expédition en Amérique du Sud, celui de Gayet (2006), plus scientifique, ainsi que le numéro spécial 39/40 de la *Revue du Musée des arts et métiers* (septembre/décembre 2003).
- ¹² Humboldt (1846-1851).
- ¹³ Dupont (2000), p. 1-101.
- ¹⁴ Cette notice connut plusieurs éditions, dans l'*Annuaire BdL* pour 1829, 1830 et 1837. La dernière édition est reproduite dans les *OC*, t. 5, p. 1-116.
- ¹⁵ *Mém. AdS* 24, p. I-CLVII, aussi *OC*, t. 2, p. 427-592.
- ¹⁶ Voir pour les voyages de 1816 et de 1834 *Mém. AdS* 13 (1832) p. LVII-CV, aussi *OC*, t. 1, p. 241-294. En Écosse, Arago a rencontré Henry Brougham, un amateur spécialiste d'optique, très conservateur, avec lequel il avait eu des relations orageuses sur des questions de priorité scientifique.
- ¹⁷ Voir *OC*, t. 7, p. 530-547.
- ¹⁸ *OC*, t. 1, p. 107-185.
- ¹⁹ Cité par Sarda (2000) p. 112.
- ²⁰ Voir dans *CRAS*, vol. index (1853), p. 319-321, la liste impressionnante des réponses de Libri à des attaques d'Arago et de Liouville en 1841 et 1843.
- ²¹ Voir la biographie de Mostert (1995).
- ²² *Lettre de M. Arago à M. Alexandre de Humboldt (au sujet du « Précis d'astronomie » de M. de Pontécoulant)*, Bachelier, Paris (1840).
- ²³ L'histoire de la Révolution de 1848 a fait, entre autres, l'objet d'un livre de Daniel Stern, pseudonyme de Marie d'Agoult, maîtresse de Liszt et mère de Cosima Wagner : *Histoire de la révolution de 1848* (1850-1853), Sandré, Paris, 3 vol.

Chapitre 2

- ¹ Daumas (1987).
- ² Sarda (2000).
- ³ On trouvera aussi des détails intéressants dans les actes du Colloque national François Arago, *Cahiers de l'Université de Perpignan*, N° 2 (1987).
- ⁴ Caron J.C. (2002) ; Garrigues J. (2002).
- ⁵ Voir Toulotte (1993).
- ⁶ Arago F. (1854) *Œuvres complètes* (*OC*), t. 1, p. 1-102. Une réédition récente de *l'Histoire de ma jeunesse* (1985, Christian Bourgeois,

- ²⁴ Cité par Sarda (2000) p. 275.
- ²⁵ D'après l'amiral Mouchez (1893), qui avait connu ces châtements, cette mesure a eu une grande importance pratique. Il va jusqu'à écrire : « *C'est certainement à l'adoucissement de la discipline et des mœurs, produit dans la Marine par l'excellent décret de M. Arago, et aux bons sentiments réciproques entre chefs et subordonnés qui en sont résultés dans la grande famille maritime, que nous devons l'incontestable supériorité du personnel actuel de notre flotte sur celui des autres nations, où l'on a plus ou moins conservé les durs procédés des siècles passés.* »
- ²⁶ On trouvera des détails intéressants, quoiqu'un peu biaisés, sur cette question dans Mahy (1893).
- ²⁷ OC, t. 2, p. 235-246.
- ²⁸ Cité par Sarda (2000) p. 286.
- ²⁹ Du 24 février au 10 mai 1848.
- ³⁰ Du 19 mars au 17 mai, où il est remplacé par le général Louis Eugène Cavaignac.
- ³¹ Cité par Sarda (2000) p. 287.
- ³² Hugo (1848) p. 582.
- ³³ Hamy (1908), lettre CVII du 9 novembre 1849, p. 294-306.
- ³⁴ OC, t. Tables, p. VII-CCLXIII.
- ³⁵ OC, t. 10, p. 168-183.
- ³⁶ CRAS, 36 (1853) p. 38-49 ; OC, t. 7, p. 548-568.
- ³⁷ Hamy (1908), lettre CVII, p. 294-306, et CVIII, p. 306-308.
- ³⁸ Citations d'après Daumas (1987) p. 275, et Sarda (2000) p. 320.
- ³⁹ Hugo V. (1863a) p. 206-208.
- ⁴⁰ Hamy (1908), lettre CXX, p. 341-343.
- ⁴¹ Cité par Sarda (2000) p. 324.
- ⁵ Grimaldi, F.M. (1665) *Physico-Mathesis de lumine, coloribus, et iride*, Haeredis Victorii Benatii, Bologne.
- ⁶ Ce point est longuement développé dans le très intéressant article de Frankel (1976), où l'on trouvera beaucoup de détails sur l'état de la théorie corpusculaire pendant la première moitié du XIX^e siècle et sur les travaux de Biot.
- ⁷ Voir pour une biographie Andriessé (1998).
- ⁸ Delamétherie J.-C. (1812) *Journal de physique, de chimie et d'histoire naturelle*, 74, p. 5-95.
- ⁹ CRAS 14 (1842) p. 35-37. Lamé écrit : « *La propagation des vibrations du fluide éthéré donne la lumière et toutes les radiations. L'accroissement ou la diminution des masses d'éther qui forment les atmosphères des atomes pondérables produit l'électricité et les phénomènes chimiques. Enfin le mouvement vibratoire de ces atmosphères donne la chaleur.* »
- ¹⁰ Hooke définit la lumière comme « un mouvement rapide de vibrations de très-petite amplitude » (*a movement quick, vibratile, of extreme shortness*) : Hooke, R. (1665), cité dans l'introduction de Fresnel (1866, 1868, 1870), t. 1, note en bas de la p. XVI.
- ¹¹ On pourra consulter sur cette période Hakfoort (1995).
- ¹² Euler (1746) Vol. III/5, p. 1.
- ¹³ Euler (1761) lettres XVIII et XXXI.
- ¹⁴ obspm.fr/histoire/acteurs
<http://www.polytechnique.fr/institution>
- ¹⁵ *Phil. Trans.* 92 (1802) p. 12. Ce texte, comme tous les textes en anglais, est traduit par nous.
- ¹⁶ Mollon J.D. (2002) *Phil. Trans.*, A 360, 807.
- ¹⁷ *Phil. Trans.*, 92 (1802) p. 387.
- ¹⁸ *Phil. Trans.*, 94 (1804) p. 1-16.
- ¹⁹ Young (1807).
- ²⁰ Bartholin, E. (1669) *Experimenta crystalli islandici disdiacastici Quibus mira et insolita refractio detegitur, Hafniae*.
- ²¹ On trouvera beaucoup de détails sur les essais et les réalisations de Rochon dans Rochon, A., *Journal de physique, de chimie et d'histoire naturelle*, 74 (1812) p. 321-340.

Chapitre 3

- ¹ Huygens (1690).
- ² Ronchi (1956). On pourra également consulter Rosmorduc & Dutour (2004).
- ³ Newton (1687).
- ⁴ Newton (1704).

- ²² Les travaux de Malus sur la polarisation se trouvent exposés dans l'article : Sur une propriété de la lumière réfléchie, *Mémoires de la Société d'Arcueil*, t. II, p. 143 (s.d.), et dans son Mémoire sur de nouveaux phénomènes d'optique ; Mémoire sur les phénomènes qui accompagnent la réflexion et la réfraction de la lumière. *Mém. AdS* pour 1810, p. 105 et 112.
- ²³ OC, t. 7, p. 291.
- ²⁴ Pour une biographie détaillée, voir Chappert (1977).
- ²⁵ Le choix par Malus du terme *polarisation* est expliqué dans son Mémoire sur de nouveaux phénomènes d'optique (1811) *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, 72, p. 393-398. Contrairement à une opinion répandue, ce choix ne vient pas d'une quelconque analogie avec les aimants.
- ²⁶ OC, t. 7, p. 291-454.
- ²⁷ Arago F. (1812) *Mém. Inst.* pour 1811 Vol. 12, p. 93-134.
- ²⁸ OC, t. 10, p. 36.
- ²⁹ CRAS, 13 (1841) p. 840-842.
- ³⁰ CRAS, 31(1850) p. 665-666.
- ³¹ Voir par exemple Delamétherie J.-C. (1816) *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts* 82, p. 5-85. L'histoire de cette découverte, qui fut faite indépendamment, mais en partie seulement, par Seebeck, est racontée par Biot en 1842 dans CRAS, 15, p. 962-975.
- ³² CRAS, 4 (1837) p. 758-766.
- ³³ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 23 ou 66.
- ³⁴ Une excellente source est l'article de Charles Fabry (1938) : La vie et l'œuvre scientifique d'Augustin Fresnel, dans *La vie et l'œuvre de Charles Fabry, Œuvres choisies publiées à l'occasion du jubilé scientifique de M. Charles Fabry*, Gauthier-Villars, 1938. Voir aussi OC, t. 1, p. 107-185, et l'introduction d'Émile Verdet aux *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel* (Fresnel 1866, 1868, 1870).
- ³⁵ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 5.
- ³⁶ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 35. Voir aussi OC, t. Tables, p. XLII-XLV. L'original est aux Archives de l'Académie des sciences, dossier Fresnel.
- ³⁷ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 9-33. Ce mémoire n'a pas été publié par l'Institut.
- ³⁸ *Mém. AdS*, t. 1, p. XLV-LXIX.
- ³⁹ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 171-181 (Note déposée à l'Institut sous forme de pli cacheté à la séance du 20 avril 1818).
- ⁴⁰ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 174.
- ⁴¹ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 41-60.
- ⁴² Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 70-73.
- ⁴³ La lettre de Fresnel est publiée dans OC, t. Tables, p. CLXXVIII-CLXXX. Il y donne à Arago de nouvelles informations sur ses découvertes et lui propose une collaboration.
- ⁴⁴ Archives de l'Académie des sciences, dossier Fresnel.
- ⁴⁵ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 129-170.
- ⁴⁶ Pour un dessin d'époque, voir OC, t.10, p. 489.
- ⁴⁷ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 247-382.
- ⁴⁸ CRAS 8 (1839) p. 259-272 et 315-327.
- ⁴⁹ ACP 10 (1819) p. 288 et suiv. ; Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 509-522. Ce mémoire est de la main d'Arago, mais on connaît l'honnêteté de ce dernier en matière de déontologie.
- ⁵⁰ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 385-439 (d'après plusieurs manuscrits de 1816).
- ⁵¹ ACP 17 (1821) p. 102, 167 et 192 ; Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 609-653. Le texte se trouve p. 629, dans une section qui porte le titre caractéristique : Considérations mécaniques sur la polarisation de la lumière.
- ⁵² ACP 20 (1822) p. 337-344. Le Mémoire sur lequel il est rapporté, présenté par Fresnel le 19 novembre 1821, se trouve dans Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 2, p.257-308.
- ⁵³ Whewell (1847) vol. II, p. 454.
- ⁵⁴ J.A. Cawood a discuté ce point d'une manière détaillée dans sa thèse : Cawood

- (1974) p. 136-149. Pour lui, l'acceptation d'une onde transversale pouvait être possible pour un physicien mathématicien comme Fresnel, car il ne s'agissait que d'un modèle, permettant de progresser dans l'interprétation et dans la prédiction des phénomènes, alors que pour Arago, physicien de la Nature, cette hypothèse impliquait une description inacceptable de l'Univers.
- ⁵⁵ OC, t. 10, p. 132-149.
- ⁵⁶ OC, t. Tables, p. CV.
- ⁵⁷ Herschel J. (1829-1833).
- ⁵⁸ D'après Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 629 sqq.
- ⁵⁹ Voir par exemple Feynman, Leighton & Sands (1964).
- ⁶⁰ CRAS, 23 (1846) p. 1103-1105.
- ⁶¹ CRAS, 29 (1849) p. 514-515.
- ⁶² Voir Lunney J.G, Weaire D. (2006) *Europhysics News*, vol. 37 n°3, p. 26-29.
- ⁶³ *Journal de Physique*, t. LII (nivôse an IX = 1801), p. 3-115.
- ⁶⁴ *Mém. AdS* t.6, p. lxx-lxxxj (1823, publié en 1827).
- ⁶⁵ Gay-Lussac & Thenard (1811) t. 2, p. 205-206.
- ⁶⁶ *Mem. AdS*, 14 (1836) p. lxxix-cxxxviii ; OC, t. 1, p. 295-369.
- ⁶⁷ Voir Lequeux J. (2008) *Early infrared astronomy*, en préparation.
- ⁶⁸ Cité par Melloni, CRAS 1 (1835) p. 503-509 ; mais s'oppose à la conception d'Ampère.
- ⁶⁹ OC, t. 7, p. 530-547.
- ⁷⁰ CRAS, 5 (1837) p. 530-537.
- ⁷¹ CRAS, 15 (1842) p. 454-460.
- ⁷² CRAS, 25 (1847) p. 447-450 ; Foucault (1878) ; Tobin (2002), Chap. 6.
- ⁷³ OC, t. 10, p. 484-492 ; ACP 3^e ser. 7 (1821) p. 207-214.
- ⁷⁴ Voir OC, t. 7, p. 530-547.

Chapitre 4

- ¹ Daumas (1987) p. 77-78.
- ² On pourra consulter sur ce sujet l'ouvrage de Eisenstaedt (2005).
- ³ *Phil. Trans.*, 35 (1728) p. 637-661.
- ⁴ Nous ne résistons pas au plaisir de donner le titre en entier : « *On the Means of discovering the Distance, Magnitude, etc. of the fixed Stars, in consequence of the diminution of the Velocity of their Light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other Data should be procured from Observations, as would be farther necessary for that Purpose* ». *Phil. Trans.*, 74 (1783) p. 35-57.
- ⁵ CRAS, 36 (1853) p. 38-49 ; OC, t. 7, p. 548-568.
- ⁶ Un cheminement possible des idées de Michell vers Arago, via Blair et Robison, est décrit par Eisenstaedt (2005) ; Blair avait construit pour réaliser les observations proposées par Michell un train de 12 prismes achromatiques mais son projet n'a pas abouti, la lumière étant très absorbée le long du parcours et insuffisamment corrigée du chromatisme.
- ⁷ Laplace (1796). Laplace mentionne les premières expériences d'Arago dans la troisième édition de 1808, en disant : « *On a reconnu [...] que les vitesses de la lumière directe et réfléchie de tous les objets célestes et terrestres étaient exactement les mêmes. Les expériences qu'Arago a bien voulu faire à ma prière ne laissent aucun doute sur ce point de physique important à l'astronomie en ce qu'il prouve la justesse de l'aberration des astres.* » Il feint donc d'ignorer qu'Arago n'avait pas trouvé non plus de différences d'une étoile à l'autre, alors que l'on s'attendait à en trouver. Il mentionne les expériences d'Arago en 1810 dans la quatrième édition de 1813 (p. 326), en concluant : « *Est-il invraisemblable de supposer que les corps lumineux lancent une infinité de rayons doués de vitesses différentes, et que les seuls rayons dont la vitesse est comprise dans certaines limites ont la propriété d'exciter la sensation de lumière, tandis que les autres ne produisent qu'une chaleur obscure ?* »

- ⁸ OC t. 1, p. I-XXXII.
- ⁹ ACP 19 (1818) p. 57, reproduit dans Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 627-636.
- ¹⁰ *La Vie des Sciences*, CRAS 6 (1989) p. 327-334. Mascart (1889-1893) t. 3, chap. 15, critique la démonstration de Fresnel et en donne une autre qui n'est guère plus satisfaisante.
- ¹¹ CRAS 33 (1851) p. 349-355.
- ¹² Michelson A.A., Morley E.W. (1886) *American Journal of Science*, 31, p. 377 et suiv.
- ¹³ Michelson A.A., Morley E.W. (1881) *American Journal of Science*, 22, p. 120 et suiv. (1887); **On the relative motion of the earth and the luminiferous ether**, *American Journal of Science*, 34, p.333 et suiv. ; **le titre** de l'article montre bien que Michelson et Morley n'avaient nullement abandonné l'idée de l'éther.
- ¹⁴ Mascart (1889, 1893).
- ¹⁵ Voir par exemple l'article d'Olivier Darrigol dans *Einstein aujourd'hui*, EDP Sciences et CNRS Éditions, p. 1-38.
- ¹⁶ CRAS, 8 (1839) p. 259-272 et 315-327.
- ¹⁷ Voir Tobin W. (1993) *Vistas in Astronomy*, 36, p. 253-294, et Tobin (2002). On y trouvera beaucoup de détails et une bibliographie complète.
- ¹⁸ *Phil. Trans.*, 124 (1834) p. 583-591.
- ¹⁹ CRAS, 7 (1838) p. 954-965, reproduit dans OC, t. 7, p. 569-599.
- ²⁰ CRAS, 30 (1850) p. 551-560.
- ²¹ CRAS, 30 (1850) p. 771-774.
- ²² CRAS, 30 (1850) p. 489-495, reproduit dans OC, t. 7, p. 569-599.
- ²³ Lissajous J. (1869) Notice historique sur la vie et les travaux de Léon Foucault, reproduite dans Foucault (1878), p. 1 du vol. des planches.
- ²⁴ Voir note 20.
- ²⁵ Galilée (1633-1637) *Discours concernant deux sciences nouvelles ...* Traduction par Maurice Clavelin, Presses Universitaires de France (1995), p. 38-39.
- ²⁶ Voir note 3.
- ²⁷ Delambre J. (1817) *Tables Écliptiques des Satellites de Jupiter d'après la Théorie de M. le Marquis de Laplace, et la totalité des observations faites depuis 1662 jusqu'à l'an 1802*, Courcier, Paris.
- ²⁸ CRAS, 29 (1849) p. 90-92. L'expérience, ses motivations et ses conséquences sont analysées en détail par Frercks J. (2000) *Centaurus*, 42, p. 249 ; on peut contacter l'auteur à jan.frercks@uni-oldenburg.de
- ²⁹ Le Verrier U.-J. (1858) *Annales de l'Observatoire Impérial de Paris - Mémoires*, 4, p. 1-262.
- ³⁰ Voir la note 20.
- ³¹ Les résultats de Cornu sont détaillés dans un mémoire de 316 pages : *Annales de l'Observatoire de Paris - Mémoires*, 13 (1876) p. A.1-317.

Chapitre 5

- ¹ Arago a donné une excellente biographie de Volta : voir OC, t. 1, p. 187-240.
- ² Volta A. *Phil. Trans.* (1800) 90, p. 403-431. Cet article est en français et contient les figures que nous présentons.
- ³ ACP 2 (1816) p. 210-213 : OC, t. 4, p. 404.
- ⁴ Gay-Lussac & Thenard (1811).
- ⁵ Pour une histoire très complète de l'électromagnétisme, voir Darrigol (2003).
- ⁶ Arago a publié une traduction française du mémoire d'Ærsted, avec une note de sa main : ACP 14 (1820) p. 417-425.
- ⁷ Voir la note précédente.
- ⁸ Anonyme (Ampère) (1824).
- ⁹ Voir Blondel (1982).
- ¹⁰ Les travaux d'Ampère ont d'abord été publiés par Arago dans les ACP, 15 (1820) p.59-76 et 170-218 ; 18 (1821) p. 88-106 et 313-333 ; 20 (1822) p. 60-74 et p. 398-421, puis par l'Académie des sciences : *Mém. AdS* 6 p. 175-388. On pourra aussi voir Ampère & Babinet (1822). Consulter aussi le site <http://www.ampere.cnrs.fr>
- ¹¹ ACP, 22 (1823) p. 358-365, avec planche.

- ¹² *Mém. AdS*, 4, p. CXXVII-CXXXI.
- ¹³ *ACP*, 15 (1820) p. 222-223.
- ¹⁴ *ACP*, 20 (1822) p. 398-421. Elle sera complétée par Demontferrand et surtout par Savary : *ACP*, 22 (1823) p. 91-100.
- ¹⁵ *ACP*, 26 (1824) p. 134-162 et 246-258.
- ¹⁶ *ACP*, 15 (1820) p. 82 et 93-102.
- ¹⁷ Ampère & Babinet (1822).
- ¹⁸ *OC*, t. 4, p. 405-448.
- ¹⁹ *ACP*, 20 (1822) p. 60-74.
- ²⁰ Les découvertes de Faraday ont été remarquablement bien analysées par le physicien Tyndall (1868).
- ²¹ Anonyme (Ampère) (1824); voir aussi *ACP*, 18 (1821) p. 88-106 et 20 (1822) p. 60-74.
- ²² Voir le très intéressant article de L. Pearce Williams sur Faraday dans Gillispie (1970-1990), Vol. 4, p. 527.
- ²³ *OC*, t. 4, p. 424-448.
- ²⁴ *ACP*, 28 (1825) p. 325.
- ²⁵ L'annonce a été faite à la séance de l'Académie du 4 septembre 1826 : voir *ACP*, 33 (1826) p. 322 et 323.
- ²⁶ D'après Tyndall (1868). Parmi les tentatives d'explication, on peut citer celles de Poisson *ACP*, 32 (1826) p. 225-240 et 306-307.
- ²⁷ *Phil. Trans.*, 115 (1825) p. 467-496.
- ²⁸ *ACP*, 32 (1826) p. 213-223. Cet article contient aussi la réfutation de la priorité réclamée par Brewster.
- ²⁹ Les observations de Nobili et Bacelli sont publiées en traduction française dans la *BUG*, 31 (1826) p. 45 et suiv.
- ³⁰ *Phil. Trans.*, 115, p. 467-496.
- ³¹ *Phil. Trans.*, 122 (1832) p. 125.
- ³² Elles sont consignées dans les *OC*, t. 4, p. 424-418.
- ³³ Faraday M. *Phil. Trans.*, 142 (1852) p. 25-56.
- ³⁴ Voir note précédente.
- ³⁵ Maxwell (1885), p. 206.
- ³⁶ *CRAS*, 4 (1837) p. 267-279. Pour une histoire détaillée, voir *CRAS*, 20 (1845) p. 199-212.
- ³⁷ Voir *ACP*, 22 (1823) p. 199-201.
- ³⁸ Faraday M. *Phil. Trans.*, 136 (1846) p. 1-20.
- ³⁹ Beaucoup de détails concernant cette section se trouvent dans Figuier (1868) ; mais ses informations ne sont pas toujours fiables.
- ⁴⁰ *CRAS*, 3 (1836) p. 778-779 ; les mesures ont été faites par Antoine-César Becquerel et un certain Breschet.
- ⁴¹ *CRAS*, 6 (1838) p. 429-437 ; mesures d'Antoine-César Becquerel et de Breschet.
- ⁴² Pour l'histoire des débuts du télégraphe électrique, voir Amyot *CRAS*, 7 (1838) p. 80-83.
- ⁴³ *ACP*, 15 (1820) p. 72.
- ⁴⁴ Voir *CRAS*, 7 (1838) p. 590-593.
- ⁴⁵ Voir *CRAS*, 7 (1838) p. 593-595.
- ⁴⁶ Voir le site <http://www.telegraphe-chappe.com/>
- ⁴⁷ *CRAS*, 10 (1840) p.896-897.
- ⁴⁸ Voir Figuier (1868) Vol. 2, p. 403.

Chapitre 6

- ¹ L'histoire et les méthodes de la géodésie et de la cartographie sont détaillées dans deux ouvrages, auxquels nous empruntons beaucoup : Berthaut (1898), et Levallois (1988). On trouvera des détails historiques et des explications très claires dans l'excellent article de Vincent Deparis (2001) accessible sur <http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Geodynamique>
- ² Pour des détails, et sur l'œuvre de Picard en général, voir Picolet (1987).
- ³ Clairaut (1743).
- ⁴ Les tribulations de l'expédition au Pérou sont décrites avec beaucoup d'humour dans le livre de Florence Trystram (1979) ; on trouvera des détails sur l'expédition en Laponie dans Levallois (1988).

- ⁵ Voir Biot & Arago (1821).
- ⁶ *AP*, t.4, p. 46-70.
- ⁷ Il y avait déjà beaucoup de mesures en 1814 : voir par exemple Mathieu, *CdT* pour 1816, p. 314-332. Mathieu en déduit un aplatissement de l'ordre de 1/315.
- ⁸ *CRAS* 12 (1841) p. 426-430.
- ⁹ Ces opérations sont très bien connues grâce aux comptes rendus du Major-General Roy W. *Phil. Trans.* 80 (1790) p. 111-270, aussitôt traduit par Prony (1791), et de Cassini IV, Méchain & Legendre (s.d., 1791 ?); ces publications décrivent les instruments utilisés et leur fonctionnement.
- ¹⁰ On trouvera des détails sur les raccordements de Paris et Greenwich dans Débarbat, S., *114^e Congrès National des Sociétés Savantes* (1989), Paris, p. 47-96, et Débarbat, S. *Revue XYZ* 79 (1999) p. 77-82.
- ¹¹ Le cercle de Borda et son fonctionnement sont décrits en grand détail dans Cassini IV, Méchain & Legendre (s.d., 1791 ?), ainsi que dans l'*AP*. Le principe de la répétition est dû à Johann Tobias Mayer, et d'après Berthaut (1898), le premier cercle répétiteur aurait été construit par Lenner en 1780.
- ¹² *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* (1788) p. 706-717.
- ¹³ Méchain P.F.A., Delambre J.B.J. (1806-1810). On trouvera des articles intéressants sur le sujet dans le cahier *Méchain et la longueur du mètre* dans la *Revue XYZ* de l'Association Française de topographie, décembre 2004.
- ¹⁴ Voir Guedj (1997), Guedj (2000), et Adler (2004).
- ¹⁵ Voir par exemple *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, 49 (1799) p. 98-116.
- ¹⁶ L'histoire très compliquée de ces mètres étalons et de ceux qui ont suivi est rapportée par Wolf, C. *Annales de l'Observatoire de Paris, Mémoires*, 17 (1883) p.C1-C78.
- ¹⁷ *CdT* pour 1816, p. 345-358 ; voir aussi Biot *CRAS*, 16 (1843) p. 1019-1032 .
- ¹⁸ *BUG*, 38 (1828) p. 165 et suiv. et 250 et suiv. ; aussi *CdT* pour 1831, p. 58-77.
- ¹⁹ *OC*, t. 10, p. 115-137 et 138-139.
- ²⁰ *OC*, t. 11, p. 55-114. L'ensemble des observations et quelques autres sont détaillées dans Biot & Arago (1821). L'introduction (p. vii-xxx) donne beaucoup de détails sur les difficultés qu'ils ont rencontrées. On la retrouve dans les *Mém. AdS* pour 1817, p. lxxijj-cxxij.
- ²¹ Les résultats eux-mêmes sont consignés dans le Tome 3 de la *Base du système métrique* (Méchain & Delambre 1806-1810).
- ²² *CdT* pour 1822, p. 346-348.
- ²³ *CdT* pour 1810, p. 485-488 ; aussi *Annu. BdL* pour 1809, p. 81-87.
- ²⁴ *CdT* pour 1810, p. 383-386 ; *CdT* pour 1819, p. 292-302 ; voir aussi Delambre (1912).
- ²⁵ *CRAS*, 3 (1836) p. 428-433, 450-453 et 483-486, et *CdT* pour 1844, p. 123-131.
- ²⁶ *Mem. AdS*, 16 (1836) p. 3-25 et 457-459.
- ²⁷ *CRAS*, 12 (1841) p. 1176-1185.
- ²⁸ Une histoire et l'essentiel des textes légaux concernant le système métrique jusqu'à 1930 se trouvent dans Anonyme (1930).
- ²⁹ Voir Rovera G.D. *Revue XYZ*, 101 (2004) 53-54.
- ³⁰ *ACP*, 5 (1817) p. 351-356 ; 12 (1819) p. 37-39 et 337-341.
- ³¹ *ACP*, 20 (1820) p. 438-439.
- ³² Voir *OC*, t. 3., p. 603
- ³³ *Phil. Trans.*, 118 (1828) p. 153-239.
- ³⁴ *Phil. Trans.*, 116 (1826) p. 77-126.
- ³⁵ *CRAS*, 24 (1847) p. 430.
- ³⁶ *CRAS*, 39 (1854) p. 553-566. L'article est co-signé par les deux directeurs, Airy et Le Verrier, mais ce sont Dunkin et Faye qui ont fait les observations. Il contient un bon historique des déterminations antérieures. Arago avait fait préparer la liaison télégraphique pour cette opération dès avril 1853 : voir *CRAS*, 36 (1853) p. 740.
- ³⁷ D'après Levallois (1988) et Vincent R., *Revue XYZ*, 101 (2004) p. 40-42.
- ³⁸ Un article très complet sur les nivellements barométriques est dû à d'Aubuisson (1810)

- Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, 70, p. 437-473 et 71, p. 5-42ter.
- ³⁹ ACP 5 (1817) p. 234-260
- ⁴⁰ D'Hollander R., *Revue XYZ*, 98 (2004)
- ⁴¹ Brousseau (Colonel), Nicollet J.N. *BUG* 33, p. 181-196 et 272-283 (1826).
- ⁴² *CdT* pour 1829, p. 252-295.
- ⁴³ *BUG*, 31 (1826) p. 273 et suiv.
- ⁴⁴ *CdT* pour 1820, p. 281-304.
- ⁴⁵ D'après Berthaut (1898).
- ⁴⁶ Bourda G., Capitaine N. *Revue XYZ*, 101 (2004) p. 49-52.
- ⁴⁷ Pour des détails sur la Nouvelle triangulation française et sur l'évolution ultérieure des techniques géodésiques, voir Duquenne F., *Revue XYZ*, 101 (2004) p. 55-57.
- ⁴⁸ Compte rendu de la séance du BdL du 14 mai 1845.
- ⁴⁹ *CRAS*, 36 (1853) p. 29-31.
- ⁵⁰ *CRAS*, 35 (1852) p. 820-821.
- ⁹ *OC*, t. 12, p. 99-101.
- ¹⁰ *OC*, t. 6, p. 593.
- ¹¹ *CRAS*, 27 (1848) p. 53 .
- ¹² *CRAS*, 39 (1854) p. 949-961 .
- ¹³ Cet instrument remplaçait peut-être lui-même un « *instrument universel ou équatorial du [citoyen] Hautpois, qui fut acheté dix mille francs pour l'observatoire* » : il est mentionné par Lalande J., *Histoire de l'Astronomie pour 1794*, *CdT* pour 1799, p. 282-318.
- ¹⁴ *CRAS* 25 (1847) p. 155.
- ¹⁵ Voir Tobin (2002).
- ¹⁶ Une histoire détaillée de cet instrument est due à Philippe Véron (2003) *Revue d'histoire des sciences*, 56, N°1, accessible par <http://ftp.obs-hp.fr/www/preprints/pp158/pp158.pdf>
- ¹⁷ *OC*, t. 6, p. 585-595.
- ¹⁸ Cité par Bigourdan (1928-1932).
- ¹⁹ Cet objectif avait été réalisé à partir de disques de crown et de flint que Bontemps avait réussi à produire à la verrerie de Choisy-le-Roi : cf. Bontemps, *CRAS*, 18 (1844) p. 15-417. Bontemps (*CRAS*, 18 (1844) p. 955-957) avait proposé de fournir à prix coûtant des disques pour les grandes lunettes projetées par l'Observatoire, jusqu'à 55 cm et même 1 m de diamètre, mais ces propositions n'ont pas eu de suite.
- ²⁰ Cité par Véron, *op. cit.* (cf. la note 16).
- ²¹ voir Dollfus A. (2006) *La grande lunette de Meudon*, CNRS Éditions, Paris.
- ²² *Comptes rendus des réunions du Bureau des longitudes*, manuscrit inédit compilé par Guillaume Bigourdan, Observatoire de Paris.
- ²³ Hamy (1908), note en bas de la lettre LXX du 18 février 1841.
- ²⁴ Jamin (1885).
- ²⁵ Jamin (1885).
- ²⁶ Hamy (1908).
- ²⁷ Hugo (1863).
- ²⁸ Voir <http://www.bibli.obspm.fr/hugoLB.htm>

Chapitre 7

- ¹ Cassini (1810).
- ² Wolf (1902).
- ³ Sur Claude Perrault et la construction de l'Observatoire, voir Wolf (1902) et Picon (1988).
- ⁴ On trouvera de nombreuses illustrations représentant des instruments d'astronomie de l'origine à 1900, ainsi que des renseignements très intéressants sur leurs constructeurs et leur usage, dans Repsold (1908, 1914).
- ⁵ Lalande J. *Histoire de l'Astronomie pour l'an VIII* (1800), *CdT* pour 1805, p. 235-273.
- ⁶ Voir l'histoire du *Bureau des longitudes de Bigourdan* (1928-1932).
- ⁷ Gautier *BUG* (1824) 27, p. 257-280 ; (1825) 28, p. 89-106, 173-188 et 253-271 ; 29, p. 3-23 et 89-119.
- ⁸ *AP*, t. 2, p. 393.

- ²⁹ *Ann. BdL* pour 1842, p. 609-642.
- ³⁰ OC, t. 7, p. 136-290.
- ³¹ Voir Tobin (2002) chap. 13.
- ³² *Observations astronomiques faites à l'Observatoire impérial de Paris*, an XII [1803] -1809, Imprimerie impériale, Paris (1805-1812).
- ³³ *Observations astronomiques faites à l'Observatoire royal de Paris*. Tome premier [1810-1819] ; Tome deuxième [1820-1829], Bachelier, Paris (1825 et 1838). Il y a ensuite une interruption pendant la reconstruction des cabinets et l'installation de nouveaux instruments. Puis les observations reprennent et sont publiées dans les *Observations astronomiques faites à l'Observatoire de Paris*, 10 vol. [1837-1846], Bachelier (1837-1846[?]) ; ces dernières concernent celles faites à la lunette méridienne de Gambey et au cercle mural de Fortin. Des cahiers supplémentaires étaient prévus pour d'autres observations, notamment celles faites au cercle mural de Gambey, mais ils n'ont jamais paru. Les observations réduites par Le Verrier et son Bureau de calcul sont publiées dans les vol. II à X des *Annales de l'Observatoire de Paris* (1859-1866).
- ³⁴ Il existe de nombreux textes sur la découverte de Neptune. Le meilleur, malheureusement peu accessible, est sans doute celui de Danjon (1946).
- ³⁵ *CdT* pour 1843, p. 3-66.
- ³⁶ CRAS, 14 (1842) p. 487-488.
- ³⁷ CRAS, 14 (1842) p. 371-373 et 406-407.
- ³⁸ Voir CRAS, 14 (1842) p. 579-582 et 660-663.
- ³⁹ CRAS, 21(1845) p. 524-525.
- ⁴⁰ *CdT* pour 1849, p. 3-254. Le Verrier a publié sur la découverte de Neptune quatre articles dans les *Comptes rendus* : CRAS, 21 (1845) p. 1050-1055 ; 22 (1846) p. 907-918 ; 23 (1846) p. 428-438 et 657-659.
- ⁴¹ CRAS, 23 (1846) p. 659-662.
- ⁴² Voici une citation plus complète de la lettre de Galle (en français), reproduite en facsimile par Danjon (1946) : « *La planète, dont vous avez signalé la position, réellement existe*
- Le même jour, où j'ai reçu votre lettre, je trouvais une étoile de 8^e grandeur, qui n'étoit pas inscrite dans l'excellente carte Hora XXI (dessinée par M. le Dr. Bremiker) de la collection des cartes célestes, publiée par l'Académie roy. de Berlin. L'observation du jour suivant décida, que c'était la planète cherchée. Nous l'avons comparée, M. Encke et moi, par la grande lunette de Fraunhofer, avec une étoile de 9^e grandeur.[...] »*
- ⁴³ CRAS 23 (1846) p. 741-754.
- ⁴⁴ Sheehan W., Kollerstrom N., Waff G., *Pour la Science*, 329, p. 24-29 (mars 2005). Sheehan et Thurber S. (2007, *Notes and records of the Royal Society*, 2007, en ligne comme doi :10.1098/rsnr.2007.0187) considèrent qu'Adams pourrait avoir souffert du syndrome d'Asperger, un désordre autistique qui aurait considérablement affecté ses relations avec les autres.
- ⁴⁵ Lettre reproduite dans l'*Annu. BdL* pour 1933, p. A.30-A.33.
- ⁴⁶ CRAS, 25 (1847) p. 945-953.
- ⁴⁷ CRAS, 27 (1848) p. 202-208 ; une première réponse de Le Verrier se trouve p. 208-210.
- ⁴⁸ CRAS, 27 (1848) p. 273-279.
- ⁴⁹ CRAS, 25 (1847) p. 465-466 .
- ⁵⁰ Voir la lettre de Laugier au ministre dans l'*Annu. BdL* (1932) p. A89-A90.
- ⁵¹ Le Verrier U.-J. (1855) Rapport sur l'Observatoire impérial de Paris et projet d'organisation, *Annales de l'Observatoire de Paris*, t. 1, p. 1-68, Mallet-Bachelier, Paris.

Chapitre 8

- ¹ Daumas (1987).
- ² Danjon (1953).
- ³ Laplace (1796) éd. de 1836, p. 134.
- ⁴ *Phil. Trans.*, 101 (1811) p. 269-336.
- ⁵ Delamétherie J.-C. Discours préliminaire, *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts* 72 (1811) p. 3-107.
- ⁶ *Annu. BdL* pour 1842, p. 249-608. La notice des OC, t. 3, p. 381-429, ne contient pas les

- idées personnelles d'Arago, qui se retrouvent dispersées en d'autres endroits des OC.
- ⁷ Anonyme (certainement Delambre), *CdT* pour 1815, p. 215-221.
- ⁸ Bigourdan (1931), p. A.1-A.151.
- ⁹ *CRAS*, 28 (1849) p. 218-220 et 597-602.
- ¹⁰ Observations astronomiques faites à l'Observatoire impérial de Paris, pendant l'année XIII et les six premiers mois de l'an XIV : *CdT* pour 1809, p. 219-328.
- ¹¹ *CdT* pour 1816, p. 345-358 ; voir aussi *CRAS* 15 (1842) p. 944-947.
- ¹² *ACP*, 29 (1825) p. 318.
- ¹³ *Phil. Trans.*, 73 (1783) p. 247-283.
- ¹⁴ *CRAS*, 28 (1849) p. 573-576 ; 37 (1853) p. 874-879.
- ¹⁵ *CRAS*, 7 (1838) p. 793-795, *OC*, t. 11, p. 201-209.
- ¹⁶ *AP*, t. 4, p. 787-790.
- ¹⁷ *CRAS*, 25 (1847) p. 136-144 ; 26 (1848) p. 64-69 et 73-76 ; 30 (1850) p. 68-76, 76-81, 117-126, 413-415, 415-416 ; 35 (1852) p. 859-863.
- ¹⁸ Voir *OC*, t. 11, p. 245-304 (Mars) ; p. 342-345 (Mercure) ; p. 346-353 (Vénus) ; p. 354-389 (Jupiter) ; p. 390-426 (Saturne et son anneau) ; p. 427-428 (Uranus).
- ¹⁹ *AP*, t. 3, p. 463-467.
- ²⁰ *AP*, t. 3, p. 434-442.
- ²¹ Voir dans *AP*, t. 4, p. 181-322, le long chapitre sur les « météores cosmiques ».
- ²² *ACP*, 27 (1824) p. 89-90.
- ²³ Tisserand (1893)
- ²⁴ Voir *AP*, t. 2, p. 139-152.
- ²⁵ *Phil. Trans.*, 85 (1795), p. 46-72.
- ²⁶ *Ann. BdL* pour 1842, p. 249-608.
- ²⁷ *OC*, t. 7, p. 112-135 : extension de la notice parue dans l'*Ann. BdL* pour 1846, p. 271-477, où l'on trouve une planche assez médiocre représentant le Soleil éclipsé en 1842, où les protubérances sont peintes (à la main ?) en rose.
- ²⁸ Bailly (1830).
- ²⁹ Anonyme (1823).
- ³⁰ Herschel J. (1853).
- ³¹ Flammarion (1892).
- ³² Flammarion (1880). Il y écrit que Jean Chacornac, astronome à l'Observatoire de Paris, avait même repris l'idée ancienne selon laquelle les taches seraient des fumées opaques issues de volcans, et que d'autres considéraient encore qu'il s'agiraient de scories sombres flottant sur un liquide brillant.
- ³³ *CRAS*, 14 (1842) p. 843-861.
- ³⁴ *CRAS*, 22 (1846) p. 281-286.
- ³⁵ *OC*, t. 10, p. 231-250.
- ³⁶ *AP*, t. 3, p. 591-612.
- ³⁷ *AP*, t. 4, p. 425-430.
- ³⁸ *AP*, t. 2, p. 261-484.
- ³⁹ *AP*, t. 2, p. 444-457. Voir aussi t. 3, p. 368-374.
- ⁴⁰ *AP*, t. 2, p. 447-454, 454-457, 457-465, 465-474, 475-480 ; t. 3, p. 107-116, 452-454, 455-456.
- ⁴¹ *ACP*, 13 (1820) p. 104-110.
- ⁴² *CRAS*, 1 (1835) p. 255-258.
- ⁴³ Voir la traduction française du mémoire de Bessel dans la *CdT* pour 1840. Le passage suivant montre bien l'insuffisance de la France en matière d'instrumentation astronomique : « *Les recherches sur la constitution des comètes rentrent dans le domaine de la physique ; mais d'un autre côté les astronomes [allemands] étant en possession d'instruments plus puissants, sont plus favorablement placés pour faire ces observations. M. Arago, qui réunit les qualités du physicien à celles de l'astronome, s'est aussi occupé de cette comète, et le désir que mes observations puissent lui être utiles est un des principaux motifs qui m'engagent à en accélérer la publication.* »
- ⁴⁴ Pour la physique des comètes, voir Encrenaz T. et al. (2003), et pour une histoire (en anglais) <http://deepimpact.eso.org/Background/comet-history-1.html> et <http://deepimpact.eso.org/Background/comet-history-2.html>

- ⁴⁵ Bouguer (1760).
- ⁴⁶ Lambert (1760). La préface de la traduction anglaise récente constitue une excellente histoire de la photométrie.
- ⁴⁷ OC, t. 10, Mémoire sur les moyens de résoudre la plupart des questions de photométrie que la découverte de la polarisation de la lumière a fait naître, lu à l'Académie des sciences, le 5 août 1833, p. 150-167 ; Premier mémoire sur la photométrie – Détermination expérimentale de la loi du carré du cosinus, lu à l'Académie des sciences, le 18 mars 1850, p. 168-183 ; Deuxième mémoire sur la photométrie – Construction de la table des quantités de lumière réfléchie et de lumière transmise par une lame de verre à faces parallèles, lu à l'Académie des sciences, le 1^{er} avril 1829 (mémoire inédit à l'époque), p. 184-215 ; Troisième mémoire sur la photométrie – Évaluation des quantités de la lumière réfléchie et de la lumière transmise par une lame de verre sous les plus grands angles, lu à l'Académie des sciences, le 15 avril 1850, p. 216-230 ; Quatrième mémoire sur la photométrie – Sur la constitution physique du Soleil, lu à l'Académie des sciences, le 29 avril 1850, p. 231-250 ; Cinquième mémoire sur la photométrie – Intensité de la lumière atmosphérique dans le voisinage du Soleil, etc., lu à l'Académie des sciences, le 20 mai 1850, p. 251-260 ; Sixième mémoire sur la photométrie – Constitution physique et photométrie des étoiles, etc., mémoire inédit (note de Barral), p. 261-281 ; Septième mémoire sur la photométrie – Application à la solution de divers problèmes d'astronomie et de météorologie, communiqué à l'Académie des sciences, le 17 juin 1850, p. 282-297.
- ⁴⁸ AP, t. 2, p. 169.
- ⁴⁹ Voir Tobin (2002).
- ⁵⁰ L'original est reproduit dans Tobin (2002), et dans Lequeux (2005).
- ⁵¹ Secchi (1875 et 1877) *Le Soleil* ; voir le t. 1, p. 121-138. Cet ouvrage est d'un très grand intérêt historique. Secchi est un des auteurs qui ne mentionnent pas les travaux d'Arago sur la polarisation. Il ne cite que sa photométrie du Soleil.
- ⁵² Comme par exemple le photomètre de Capocci mentionné dans les CRAS, 6, p. 241-242 (1838).
- ⁵³ *Phil. Trans.*, 107 (1817) p. 302-331.
- ⁵⁴ Herschel J.F.W. (1847) *Results of astronomical observations made during the years 1834, 5, 6, 7, 8 at the Cape of Good Hope*, Smith Elder and Co, London, p. 371.
- ⁵⁵ D'après Mascart (1893) p. 269.
- ⁵⁶ D'après Sterken & Staubermann (2000), p.95-111.
- ⁵⁷ Voir la référence précédente et Zöllner J.K.F. (1865) *Photometrische Untersuchungen*, Engelmann, Leipzig.
- ⁵⁸ *Annals of the Harvard College Observatory*, 11 (1877) p. 1-8.
- ⁵⁹ *Ann. BdL* pour 1852, p. 363-504 ; CRAS 10 (1840) p. 83-84 ; OC, t. 7, p. 1-111 (cette notice reproduit celle de l'*Ann. BdL* avec quelques modifications mineures, et un appendice reprend quatre textes antérieurs).
- ⁶⁰ Huygens (1698).
- ⁶¹ Humboldt (1816) t. 4, voir la note B p. 285-287.
- ⁶² AP, t. 1, p. 364-371.
- ⁶³ AP, t. 2, p. 137.
- ⁶⁴ *Phil. Trans.* (1829) 119, p. 19-27.

Chapitre 9

- ¹ Becquerel & Becquerel, E. (1847a).
- ² CRAS, 38 (1854) p. 1038-1046.
- ³ OC, t. 9, p. 433-488.
- ⁴ CRAS, 7 (1838) p. 206-224 ; aussi OC, t. 9, p. 535-542.
- ⁵ OC, t. 9, p. 488-534. Les deux vols se sont déroulés dans des circonstances tragiques narrées avec beaucoup d'humour par Léon Foucault (voir Tobin 2002, p. 310-313). Les astronautes ont atteint 7049 m d'altitude, où ils ont trouvé une température de -39°C . Cette altitude est longtemps restée un record.

- ⁶ Pour une histoire de la météorologie et une belle iconographie concernant les instruments anciens, voir Javelle *et al.* (2000). Voir aussi Fierro (1991).
- ⁷ Pour le XVIII^e siècle, voir Debyser (2007).
- ⁸ Pour d'autres détails, voir *ACP*, t. 3 (1816), p. 438-442.
- ⁹ *Mém. AdS* pour 1734, p. 123-134, et planches.
- ¹⁰ Observatoire impérial de Paris. Historique des entreprises météorologiques, 1854-1867, in *Annales de l'Observatoire impérial de Paris*, publiées par U.-J. Le Verrier, *Mémoires*, t. 9, Mallet-Bachelier, Paris (1868). Voir aussi CRAS 38 (1854) p. 797-799, et la réponse de Laugier p. 799-800.
- ¹¹ Bouvard A. (1827) *Mém. AdS*, 7, p. 267-343.
- ¹² *ACP*, 24 (1823) p. 280-294.
- ¹³ *OC*, t. 8, p. 1-24, voir p. 1.
- ¹⁴ Voir son Histoire des entreprises météorologiques, citée dans la note 10.
- ¹⁵ Voir *ACP*, 5 (1817) p. 102-111.
- ¹⁶ *ACP*, 4 (1818) p. 216 et *AP* t. 4, p. 588.
- ¹⁷ Becquerel & Becquerel, E. (1847a).
- ¹⁸ *Annu. BdL* pour 1838, p. 221-614 ; *OC* t. 4, p. 1-404.
- ¹⁹ *OC*, t. 11, p. 619-653.
- ²⁰ Pour cette histoire, voir Gary (1994).
- ²¹ Wells (1817). Cet ouvrage est analysé par Arago dans *ACP* 5 (1817) p. 183-216 ; il y ajoute des détails intéressants.
- ²² *OC*, t. 8, p. 83-146. Il s'agit de la réunion ordonnée de plusieurs notices parues dans *l'Annu. BdL* pour 1827 et 1828.
- ²³ *OC*, t. 8, p. 25-82, notice parue dans *l'Annu. BdL* pour 1833.
- ²⁴ *OC*, t. 8, p. 120-124.
- ²⁵ *AP*, t. 3, p. 497-503.
- ²⁶ *Mém. AdS*, 7, p. 569-604 (1827) ; aussi *ACP* 27 (1824) p. 136-167.
- ²⁷ CRAS, 7 (1838) p. 24-65.
- ²⁸ *Phil. Trans.*, 151 (1861) p. 1-36.
- ²⁹ Tobin (2002) p. 73-74.
- ³⁰ *OC*, t. 8, p. 1-24, paru dans *l'Annu. BdL* pour 1833.
- ³¹ *OC* t. Tables, p. VII-CCLXIII, voir p. CCXLIX.
- ³² *OC*, t. 11, p. 671-746.
- ³³ *OC*, t. 11, p. 662-670, reproduction d'une notice de 1824 imprimée dans la *CdT* pour 1827, p. 316-323.
- ³⁴ *OC*, t. 10, p. 548-560.
- ³⁵ *OC*, t. 10, p. 282-289.
- ³⁶ *ACP*, 29 (1825) p. 77.
- ³⁷ Pour l'histoire des observations magnétiques à l'Observatoire de Paris de 1667 à 1872, voir Rayet G. (1876) *Annales de l'Observatoire de Paris*, t. 13, *Mémoires*, p.A.*1-A.*40.
- ³⁸ Voir la description de cette boussole dans *Mém. Inst.* 5 (an XII) p. 145-154.
- ³⁹ Les mesures et les conclusions d'Arago sont résumées dans son gros *Mémoire sur le magnétisme terrestre*, *OC*, t. 4, p. 459-541. Voir aussi les commentaires de Le Mouël (2006).
- ⁴⁰ Voir *Mém. AdS*, t. 8 (1825, paru en 1829) p. XV-XVIII.
- ⁴¹ *ibid.* et *CdT* pour 1828, p. 322-330.
- ⁴² Lamé G. (1840). Voir aussi Becquerel & Becquerel E. (1847) t. 3, p. 106-120, avec planches représentant les magnétomètres de Gauss.
- ⁴³ Voir Rayet G. (1876), note 37.
- ⁴⁴ *ACP*, 44 (1830) p. 231-243.
- ⁴⁵ *AP*, t. 2, p. 180-181.
- ⁴⁶ CRAS, 35 (1852) p. 364. La lettre de Wolf est indiquée comme datée du 2 août 1851, mais il faut probablement lire 1852. La découverte de la corrélation entre le nombre de taches et la variation diurne a été faite indépendamment par le capitaine Sabine en Angleterre, Jean-Alfred Gautier en Suisse et Johann von Lamont en Allemagne.
- ⁴⁷ Cassini IV (1784) Lettre à l'éditeur du *Journal de Physique*, avril 1784.

- ⁴⁸ OC, t. 4, p. 545-706, voir p. 571-594. Voir aussi ACP 39 (1828) p. 369-390.
- ⁴⁹ Pour des détails sur ces différents points, voir par exemple Dormy E. *Europhysics news* 37 (2006) n° 2, p. 22-25 et 37 n°4, p. 9.
- ⁵⁰ Pour un exposé simple de l'activité solaire et de son action sur la magnétosphère, voir Lantos (1997).
- ⁵¹ ACP, 44 (1830) p. 231-243.
- ⁵² Gauss & Weber (1840).
- ⁵³ OC, t. 4, p. 184-652.
- ⁵⁴ Voir l'excellente notice d'Arago (OC, t. 1, p. 295-369 = *Mém. AdS* t. 14, p. lxx-cxxxviii, que l'on peut trouver sur <http://www.academie-sciences.fr>), et sur son œuvre mathématique Kahane, J.-P. (2005) *Le retour de Fourier*, également sur <http://www.academie-sciences.fr>
- ⁵⁵ Voir OC, t. 11, p. 599-706.
- ⁵⁶ Buffon (1778).
- ⁵⁷ OC, t. 6 p. 263-480.
- ⁵⁸ CRAS, 19 (1844) p. 1327-1331.
- ⁵⁹ *CdT* pour 1823, p. 245-257 et 324-327.
- ⁶⁰ Ce sujet a été bien étudié par Frachon & Lefebvre (2006) Nous leur empruntons beaucoup.
- ⁶¹ OC, t. 5, p. 635-644.
- ⁶² OC, t. 5, p. 644-651 et 651-654. Pour d'autres points, voir p. 527-671.
- ⁶³ CRAS, 28 (1849) p. 749-754.
- ⁶⁴ Voir OC, t. 9, p. 52-66.
- ⁶⁵ Humboldt (1816) p. 73-74.
- ⁶⁶ Un remarquable historique et une compilation des mesures de température en profondeur sont données par Joseph Prestwich, *Phil. Trans.* 165, p. 587-674 (1875) ; voir aussi Biot, *Journal des savants* (1849), p. 65-83. Pour la salinité, voir OC t. 9, p. 548-635.
- ⁶⁷ Consulter par exemple <http://earth.usc.edu/Catalina/Oceans.htm>
- ⁶⁸ Il écrit (Humboldt 1816, p. 73) : « *Des vents foibles, mais agissant, comme les vents alizés, sans interruption sur une zone entière, causent*

un mouvement de translation que nous n'observons pas dans les plus fortes tempêtes, parce que ces dernières sont circonscrites à une petite étendue. »

⁶⁹ Voir OC, t. 9, p. 548-635.

⁷⁰ OC, t. 9, p. 50-52.

Chapitre 10

¹ OC, t. 11, p. 702-732.

² Biot J.-B., Arago F. *Mém. Inst.*, 7 (1806) p. 39-66.

³ Biot J.-B. *Mém. Inst.* 8 (1807) p. 39-66.

⁴ Le premier texte publié dans les ACP est un résumé de ces recherches : t. 1 (1816) p. 1-9 ; voir aussi un extrait dans *Mém. AdS* 8 (1825), p. xciv-c.

⁵ OC, t. 10, p. 123-131 et t. 11, p. 733-748.

⁶ *Mém. AdS.*, t. 7 (1824, paru en 1827) p. 346-373.

⁷ OC, t. 10, p. 312-333.

⁸ OC, t. 10, p. 298-311.

⁹ OC, t. 10, p. 312-333.

¹⁰ OC, t. 11, p. 702-732.

¹¹ Pour une histoire des phares en France, voir Fichou et al. (1999).

¹² OC, t. 6, p. 1-56. Voir aussi la biographie de Fresnel par Arago (OC, t. 1, p. 107-185), *l'Annu. BdL* pour 1831, p. 172-184 et Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 3, introduction ; ce tome rassemble tous les écrits de Fresnel sur les phares et quelques écrits annexes.

¹³ ACP, 16 (1821) p. 377-383 et 20 (1822) p. 317-319.

¹⁴ *Mém. AdS* pour 1748, p. 305-312. Voir aussi, pour les œuvres de Buffon, <http://www.buffon.cnrs>

¹⁵ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 3, p. 241-284 et pl. XVIII.

¹⁶ Voir CRAS, 2 (1836) p. 515-516.

¹⁷ Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 3, p. 147-152.

¹⁸ ACP, 37 (1828) p. 392-409.

- ¹⁹ *Mém. AdS* pour 1738, p. 128-146. Voir aussi p. I-V.
- ²⁰ *ACP*, 7, p. 93.
- ²¹ *ACP*, 20 (1822) p. 210-223 ; *BUG* 21 (1822) p. 21 ; *Annu. BdL* pour 1823 ; *OC*, t. 11, p. 1-12.
- ²² *ACP*, 20 (1822) p. 266-268.
- ²³ *ACP*, 23 (1824) p. 95-101.
- ²⁴ *BUG*, 43 (1830) p. 262.
- ²⁵ *ACP*, 43 (1830) p. 74-111.
- ²⁶ Par exemple dans les *Mém. AdS*, 10 (1827 paru en 1831), p. 193-210, dans l'*Annu. BdL* pour 1830, dans la *BUG* 42 (1829) p. 338 et 43 (1830) p. 262, et bien sûr dans les *OC*, t. 11, p. 13-54.
- Chapitre 11**
- ¹ *CRAS*, 20 (1845) p. 1056. Voir aussi *OC*, t. 8, p. 1-24.
- ² Arago & Lardner (1845).
- ³ *OC*, t. 8, p. 1-24.
- ⁴ *OC*, t. Tables, p. VII-CCLXIII.
- ⁵ Jamin (1885).
- ⁶ Flammarion (1880).
- ⁷ Voir pour cette controverse *CRAS*, 38 (1854) p. 521-522 et 624-628.
- ⁸ Voir *CRAS*, 67 (1868) p. 1149-1150 et 1331-1332 et 68 (1869) p. 56-61 et 92-93.
- ⁹ *OC*, t. 6, p. 57-262, Notice posthume sur les fortifications, avant-propos.
- ¹⁰ *OC*, t. 5 p. 467-489, voir p. 479-485.
- ¹¹ Ces essais sont décrits dans les *CRAS*, 20 (1845) p. 1375.
- ¹² *OC*, t. 6, Notice sur les brevets d'invention, p. 677-698.
- ¹³ *OC*, t. 5, Notice sur la navigation, p. 527-671 ; voir p. 658-671.
- ¹⁴ *OC*, t. 6, Notice sur les systèmes de la protection et du libre-échange, p. 666-676.
- ¹⁵ *OC*, t. 1, p. 107-185.
- ¹⁶ *OC*, t. 3, p. 113-155.
- ¹⁷ *Mém. ADS*, 22 (1850) p. j-cxvij ; *OC*, t. 1, p. 511-633.
- ¹⁸ *CdT* pour 1816, p. 345-358.
- ¹⁹ *Annu. BdL* pour 1853, p. 343-623.
- ²⁰ *Annu. BdL* pour 1829, p. 143-233 ; le texte final, semblable à celui paru dans l'*Annu. BdL* pour 1837, se trouve dans les *OC* t. 5, p. 1-116.
- ²¹ *Mém. AdS*, 22 (1840) p. lxj-clxxxviii ; *OC*, t. 1, p. 371-510.
- ²² Delaunay (1850).
- ²³ On trouvera une histoire très détaillée de la machine à vapeur datant de 1878, qui insiste sur les contributions anglaises et américaines, sur <http://www.history.edu/steam/thurston/1878/>
- ²⁴ *ACP*, 22 (1822) p. 403-405.
- ²⁵ *OC*, t.5, p. 117-180.
- ²⁶ Carnot, S. (1824).
- ²⁷ Lavoisier (1783) *Réflexions sur le phlogistique*, in Lavoisier (1862-1893), t. 2, p. 623-655.
- ²⁸ *CRAS*, 7, p. 781 (1838).
- ²⁹ Bernoulli D. (1738).
- ³⁰ Voir par exemple *CRAS*, 4 (1837) p. 137-168, en particulier la p. 163.
- ³¹ *CRAS*, 26 (1848) p. 408-409.
- ³² Voir pour une description plus détaillée *Mém. AdS* (1807 1^{er} semestre), p. 146-153.
- ³³ *Mém. AdS*, 5 (1821-1822) p. 104-105.
- ³⁴ *Mém. AdS*, 17 (1840) p. lxj-clxxxviii ; *OC*, t. 1 p. 371-510.
- ³⁵ *OC*, t. 5, p. 206-214.
- ³⁶ *OC*, t. 5, p. 215-226.
- ³⁷ Cité par Caron F. (1997).
- ³⁸ Cette section doit beaucoup à l'ouvrage de François Caron cité dans la note précédente.
- ³⁹ La première voie ferrée anglaise à traction hippomobile date de 1801, et la première ligne avec machines à vapeur de George Stephenson de 1825. Aux États-Unis, la première ligne a été ouverte en 1827 par la compagnie Baltimore-Ohio.

- ⁴⁰ OC, t. 5, p. 238-250.
- ⁴¹ CRAS, 14 (1842) p. 671-675.
- ⁴² Cité par Caron F. (1997), p. 102.
- ⁴³ Voir par exemple, après l'accident du 8 juillet 1846 à Fampoux, sur le chemin de fer du Nord, CRAS 23 (1846) p. 73-77.
- ⁴⁴ CRAS, 14 (1842) p. 801-807.
- ⁴⁵ OC, t. 5, p. 254-301 et p. 301-356.
- ⁴⁶ Proudhon (1846).
- ⁴⁷ Voir *Phil. Trans.*, 16 (1687) p. 21-22 et 193-195.
- ⁴⁸ CRAS, 38 (1854) p. 993-998.
- ⁴⁹ Cité par Caron F. (1997), p. 296.
- ⁵⁰ OC, t. 5, p. 393-418. Voir aussi les CRAS 18 (1844) p. 226-227, où l'on lit : « *En développant l'idée de M. Hallette, M. Arago fait remarquer qu'un système de tubes pneumatiques, fixés le long des murs du quai de la Seine, coûterait beaucoup moins cher à établir qu'un chemin de halage, et que l'emploi de la vapeur, pour faire remonter les bateaux, aurait à plusieurs égards, sur l'emploi des chevaux, des avantages marqués* ».
- ⁵¹ CRAS, 6 (1838) p. 117-118 et 402-415.
- ⁵² CRAS, 11 (1840) p. 101-115.
- ⁵³ OC, t. 5, p. 654-656.
- ⁵⁴ OC, t. 5, p. 656-658.
- ⁵⁵ CRAS, 6 (1838) p. 594-596.
- ⁵⁶ CRAS, 38 (1854) p. 146-166 ; ce texte donne beaucoup de détails sur les navires à vapeur de guerre et transatlantiques, et contient également une histoire de l'hélice, dont nous nous inspirons au paragraphe suivant.
- ⁵⁷ CRAS, 10 (1840) p. 675-679 ; 11 (1840) p. 687-693.
- ⁵⁸ Voir Lagrée (2003) p. 169.
- ⁵⁹ CRAS, 25 (1847) p. 517-520.
- ⁶⁰ CRAS, 38 (1854) p. 1122-1141.
- ⁶¹ OC, t.7, p. 455-517. Voir aussi Tobin (2002), chapitres 3, 4 et 6.
- ⁶² Voir à ce sujet et sur les aspects politiques McCauley (1997), p. 1-21.
- ⁶³ Pour une description de son procédé sur papier, voir CRAS, 10 (1840) p. 337.
- ⁶⁴ CRAS, 8 (1839) p. 4-7 ; reproduit en partie dans OC, t. 7, p. 455-517.
- ⁶⁵ Voir CRAS 8 (1839) p. 170-174, 207-208, 246-249, 302-305, 341, 361-362 ; 10 (1840) p. 247-248.
- ⁶⁶ Ce rapport a été publié dans le tome XXXV de *La France Littéraire*, et réédité en tant qu'Arago [1839] (voir la bibliographie).
- ⁶⁷ On pourra consulter sur ce sujet Rayet (1887), et de Vaucouleurs (1958). Beaucoup de photographies historiques sont bien reproduites dans ce deuxième ouvrage. Voir aussi Bajac Q., 1840-1875 : les faux départs de la photographie astronomique, Catalogue de l'exposition *Dans le champ des étoiles, les photographes et le ciel 1850-2000*, Musée d'Orsay, (2000), p. 11 et suiv.
- ⁶⁸ Voir OC, t. 7, p. 518-529.
- ⁶⁹ Mouchez (1893), p. 14.
- ⁷⁰ Dans Fonvielle (s.d.).
- ⁷¹ Voir le chapitre 8.
- ⁷² CRAS, 18 (1844) p. 860-862.
- ⁷³ CRAS, 30 (1850) p. 709-711.
- ⁷⁴ Voir Tobin (2002), chap. 13.
- ⁷⁵ OC, t. 5, p. 491-526 ; *Annu. BdL* pour 1846, p. 478-530.
- ⁷⁶ Toutes ces interventions sont reproduites dans les OC, t. 7, p. 511-663.
- ⁷⁷ Pour l'histoire des fortifications de Paris, voir Gagneux & Prouvost (2004).
- ⁷⁸ OC, t. 6, p. 57-262.
- ⁷⁹ OC, t. 5, p. 527-560.
- ⁸⁰ OC, t. 5, p. 560-565 : voir aussi CRAS 4 (1837) p. 314-320.
- ⁸¹ Delaunay (1850), p. 561.
- ⁸² OC, t. 6, p. 263-480.
- ⁸³ CRAS 14 (1842) p. 247-252.
- ⁸⁴ Pour une histoire des puits artésiens à Paris, voir Clément & Thomas (2001), p. 150-151.

Chapitre 12

- ¹ CRAS, 37 (1853) p. 513.
- ² Pour des détails, voir Sarda (2002).
- ³ CRAS, 37 (1853) p. 513-516.
- ⁴ Barral (1853).
- ⁵ Sainte-Beuve (1854); autrefois socialiste, Sainte-Beuve était passé au service de l'Empire.
- ⁶ Auduganne (1857).
- ⁷ Frénay (1986).
- ⁸ Pereire (1865).
- ⁹ Cité par Sarda (2002), p. 418-419. Le discours de Paul Bert, cité p. 422-423, est de la même veine.
- ¹⁰ Mahy (1893).
- ¹¹ Mouchez (1893).
- ¹² Cornu (1893).
- ¹³ Jamin (1885).
- ¹⁴ Fonville (s.d.).
- ¹⁵ Pereire (1865), p. 12.
- ¹⁶ Danjon (1953).
- ¹⁷ Des informations sur Dibbets et l'emplacement des médailles se trouvent à <http://www.amb-pays-bas-fr/fr/ambassade/pcz/arago.htm>

¹⁸ Debyser (2007).

¹⁹ On pourra lire à ce sujet les mémoires d'Anatole Abragam (2000) *De la physique avant toute chose ?*, Odile Jacob, Paris.

²⁰ Danjon (1953).

²¹ Voir Pannekoek (1989) pour la meilleure histoire de l'astronomie avant 1930, et Lequeux (2005) pour une histoire à partir de 1910.

Appendice 3

¹ Les instructions sont aussi parues dans *l'Annu. BdL* pour 1836, et se retrouvent précédées d'une introduction dans *OC*, t. 9, p. 4-133. Arago en écrira d'autres pour des expéditions dans les régions arctiques et en Algérie : voir entre autres *OC*, t. 9, p. 535-542, ou *l'Annu. BdL* pour 1839.

² *Phil. Trans.* 1, p. 140-143 (1665-1666). Nous utilisons la traduction contemporaine parue dans le *Journal des Sçavans* pour 1666, p. 193-196.

³ Ne figure pas dans la traduction du *Journal des Sçavans*.

⁴ *Phil. Trans.* 1, p. 147-149 et planche (1665-1666).

Bibliographie

L'astérisque indique que le document est accessible par Internet, sur le site du projet Gallica de la Bibliothèque de France (<http://gallica.bnf.fr>), sauf indication contraire. Un astérisque entre parenthèses signifie que le document n'est que partiellement accessible.

Revue et journaux anciens consultés

Annales de chimie et de physique (ACP).

**Annales de l'Observatoire Impérial de Paris – Mémoires* (sur <http://cdsads.u-strasbg.fr>).

Annuaire du Bureau des longitudes (Annu. BdL).

Bibliothèque universelle de Genève (BUG).

Bulletin des Sciences de la Société Philomathique de Paris.

**Comptes rendus des séances hebdomadaires de l'Académie des sciences* (CRAS).

Connaissance des temps (CdT).

Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts.

**Journal des Sçavans*.

(*)*Mémoires de l'Académie des sciences, et (avant la Révolution) Histoire de l'Académie Royale des sciences* (Mém. AdS).

**Mémoires de l'Institut des sciences, lettres et arts, Sciences mathématiques et physiques* (de la Révolution à 1815) (Mém. Inst.).

Mémoires de la Société d'Arcueil.

(*)*Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (Phil. Trans.).

Écrits d'Arago

*Arago F. (1854-1862) *Cœuvres complètes de François Arago*, ed. par J.-A. Barral, 13 vol. Gide, Paris et T. O. Weigel, Leipzig (OC) ; le premier tome contient l'*Histoire de ma jeunesse*.

*Arago F. (1854-1857) *Astronomie populaire*, ed. par J.-A. Barral, Gide et J. Baudry, Paris (AP).

Arago F. [1839] *Le daguerréotype*, L'échoppe, Paris (1987).

Biot J.-B., Arago F. (1821) *Recueil d'observations géodésiques, astronomiques et physiques exécutées*

par ordre du Bureau des longitudes de France, en Espagne, en France, en Angleterre et en Écosse, pour déterminer la variation de la pesanteur et des degrés terrestres sur le prolongement de la Méridienne de Paris, faisant suite au troisième volume de la Base du système métrique, rédigé par MM. Biot et Arago, Courcier, Paris.

Hamy E.-Th., ed. (1908) *Correspondance d'Alexandre de Humboldt avec François Arago (1809-1853)* R. Guilmoto, Paris.

Livres et documents sur Arago

(quelques autres sont cités dans la bibliographie de Sarda, 2002)

Auduganne A. (1857) *François Arago, son génie et son influence*, Garnier, Paris.

Audubert R. (1954) *Arago et son temps*, Conférence au Palais de la découverte le 19 décembre 1953.

Barral J. A. (1853) *François Arago*, Dusacq, Librairie agricole de la Maison rustique, Paris (aussi *Journal d'Agriculture pratique*, N° du 20 octobre 1853).

Barthalot R. (1987) Arago et l'Observatoire de Paris, in *François Arago, Actes du colloque national des 20, 21 et 22 octobre 1986*, Cahiers de l'Université de Perpignan, N° 2, p. 11-22.

Bijaoui A. (2003) François Arago, un astronome à l'esprit universel, *L'Astronomie* 117, p. 402-407 (sept. 2003).

Bijaoui A. (2006) François Arago, l'optique et les théories de la lumière, in *Arago, Journée scientifique du Bureau des longitudes*, Académie des Sciences, Paris, p. 35-46.

Bobis L., Lequeux J. (2003) *Catalogue de l'exposition « François Arago et l'Observatoire de Paris »*, Observatoire de Paris. Voir aussi l'exposition virtuelle sur <http://expositions.obspm.fr/F.Arago/intro.html>.

Cawood J.A. (1974) *The Scientific work of D.F.J. Arago*, Ph.D. Thesis, University of Leeds.

Cawood J. (1985) François Arago, homme de science et homme politique, *La Recherche*, 172, p. 1464-1471 (décembre 1985).

Cayrel R. (2006) Arago et la diffusion de la connaissance, in *Arago, Journée scientifique du*

- Bureau des longitudes, Académie des Sciences, Paris, p. 59-68.
- Chauvet H. (1954) *François Arago et son temps*, Ed. des amis de François Arago, Paris.
- Cornu A. (1893) Discours au nom de l'Académie des sciences et du Bureau des longitudes, *Inauguration de la statue de François Arago à Paris le Dimanche 11 juin 1893*, Firmin-Didot, Paris, p. 31-40.
- Danjon A. (1953) François Arago, *L'Astronomie* (9 décembre 1953), p. 445-464.
- Daumas M. (1987) *Arago, La jeunesse de la science*, 2^e édition, Paris, Belin, Collection *Un savant, une époque*.
- Débarbat S. (2003) Arago et les hommes de science, *L'Astronomie* 117, p. 386-392 (sept. 2003).
- Débarbat S. (2006) Arago et l'*Astronomie populaire*, in *Arago, Journée scientifique du Bureau des longitudes*, Académie des Sciences, Paris, p. 49-57.
- Dumont S. (2003) François Arago et l'*Astronomie populaire*, *L'Astronomie* 117, p. 394-400 (sept. 2003).
- *Fonvielle W. de (s.d., plusieurs éditions) *La jeunesse d'un grand savant républicain*, E. Gaillard ou Société française d'éditions d'art, Paris.
- Frachon B., Lefebvre M. (2006) Arago et la physique de la mer, in *Arago, Journée scientifique du Bureau des longitudes*, Académie des Sciences, Paris, p. 7-21.
- Frénay E. (1986) *Arago et Estagel, son village natal*, Mairie d'Estagel.
- Gerest R. (1988) *Arago, le plus grand cœur et la plus forte tête de son époque*, s.n.
- Grison E. (1987) Arago et l'École polytechnique, in *François Arago, Actes du colloque national des 20, 21 et 22 octobre 1986*, Cahiers de l'Université de Perpignan, N° 2, p. 47-66.
- Grison E. (1989) François Arago et l'École polytechnique, in *Bulletin de la Société des amis de la Bibliothèque de l'École polytechnique*, N° 4.
- Jamin J.-C. (1885) *Éloge historique de M. François Arago*, Firmin-Didot, Paris.
- Le Mouël J.-L. (2006) Arago et le magnétisme terrestre, in *Arago, Journée scientifique du Bureau des longitudes*, Académie des Sciences, Paris, p. 23-32.
- Mahy F. de (1893) Discours au nom des colonies françaises, *Inauguration de la statue de François Arago à Paris le Dimanche 11 juin 1893*, Firmin-Didot, Paris, p. 41-55.
- McCauley A. (1997) Arago, l'invention de la photographie et le politique, *Études photographiques* 2, p. 1-21 (mai 1997).
- Mirecourt E. de (1858) *François Arago*, G. Havard, Paris.
- Mouchez, amiral (1893) Discours [posthume], *Inauguration de la statue de François Arago à Paris le Dimanche 11 juin 1893*, Firmin-Didot, Paris, p. 11-21.
- Pereire I. (1865) *Discours prononcé le 31 août 1865 à l'occasion de l'inauguration de la statue de François Arago à Estagel*, impr. administrative de Paul Dupont, Paris.
- Pinet G. (s.d., 1907) *Arago, notice biographique*, coll. Panthéon polytechnicien, impr. De Lafolye, Paris.
- Poincaré R. (1893) Discours, *Inauguration de la statue de François Arago à Paris le Dimanche 11 juin 1893*, Firmin-Didot, Paris, p. 31-40.
- *Poirier J.-P. (2003) *Arago, un savant et un homme généreux*, discours prononcé le 10 juin 2003 devant l'Académie des sciences ; accessible sur http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/discours_Poirier_10_06_03.pdf
- Poirier J.-P. (2006) Arago et les notices de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes*, in *Arago, Journée scientifique du Bureau des longitudes*, Académie des Sciences, Paris, p. 69-75.
- *Sainte-Beuve (1854) *Causeries du Lundi*, Garnier, Paris : t. 10, p. 1-18.
- Sarda F. (2000) *Les Arago : François et les autres*, Paris, Taillandier, Collection *Figures de proue : biographies*. Cet ouvrage contient des extraits des discours de Jules Ferry et de Paul Bert à Perpignan (p. 418-421 et 422-423), publiés dans *l'Indépendant des Pyrénées-Orientales* le 23 septembre 1879.

Taton R. (1987) Arago et l'Académie des sciences, in *François Arago, Actes du colloque national des 20, 21 et 22 octobre 1986*, Cahiers de l'Université de Perpignan, N° 2, p. 23-46.

Ten A.E. (1987) Arago géodésien, in *François Arago, Actes du colloque national des 20, 21 et 22 octobre 1986*, Cahiers de l'Université de Perpignan, N° 2, p. 67-88.

Tisserand F. (1893) Discours au nom du comité de souscription de l'Observatoire, *Inauguration de la statue de François Arago à Paris le Dimanche 11 juin 1893*, Firmin-Didot, Paris, p. 3-9.

Livres anciens consultés

*(Ampère A.-M.) (s.d.) *Exposé méthodique des phénomènes électro-dynamiques et des lois de ces phénomènes*, Plassan, Paris.

Ampère A.-M., Babinet J. (1822) *Exposé des nouvelles découvertes sur l'électricité et le magnétisme de MM. Oersted, Arago, Ampère, H. Davy, Biot, Erman, Schweiger, de la Rive, etc.* Méquignon-Marvis, Paris.

*Anonyme (Ampère) (1824) *Description d'un appareil électrodynamique, construit par M. Ampère*, Crochard et Bachelier, Paris.

Anonyme (1823) *L'astronomie enseignée en vingt-deux leçons*, traduit de l'anglais par Ph. C., Audin, Canel, Paris.

Arago F., Lardner, D. (1845) *Popular lectures on Astronomy : by M. Arago, with additions and corrections by Dionysius Lardner, Greeley & McElrath*, New York.

*Bailly E.-M. (1830) *Manuel d'astronomie*, Roret, Paris.

*Becquerel [Antoine-César] & Becquerel, E. (1847) *Traité d'électricité et de magnétisme*, Firmin-Didot, Paris, 3 vol.

*Becquerel [Antoine-César] & Becquerel, E. (1847a) *Éléments de physique terrestre et de météorologie*, Firmin-Didot, Paris.

Bernoulli D. (1738) *Hydrodynamica*, Dulsecker, Bâle ; original latin accessible sur <http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/179/>

Berthaut, Colonel (1898) *La Carte de France 1750-1898, étude historique*, 2 Vol., Imprimerie du Service Géographique de l'Armée.

*Bouguer P. (1760) *Traité d'Optique sur la Gradation de la Lumière*, Paris, Guérin et Delatour ; accessible sur <http://www.musees-franchemonte.com/index.php?p=626>

*Buffon G.-L. de (1778) *Des Époques de la Nature*, ed. critique par J. Roger, in *Mémoires du Muséum d'Histoire Naturelle*, t. 10 (1962) ; ed. orig. accessible par <http://www.buffon.cnrs.fr>

*Carnot S. (1824) *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Bachelier, Paris ; réed. J. Gabay, Sceaux (1990).

Cassini J.D. (1810) *Mémoires pour servir à l'histoire des Sciences et à celle de l'Observatoire Royal de Paris, suivis de la vie de J. D. Cassini, écrite par lui-même, et des éloges de plusieurs académiciens morts pendant la Révolution*, Bleuët, Paris.

Cassini, J.D., Méchain P.A., Legendre A.M. (s.d., 1791 ?) *Exposé des opérations faites en France en 1787, pour la jonction des Observatoires de Paris et de Greenwich*, Institution des Sourds-Muets, Paris.

*Clairaut A. (1743) *Théorie de la figure de la Terre, tirée des principes de l'hydrostatique*, David Fils, Paris.

*Delaunay Ch. (1850) *Cours élémentaire de mécanique théorique et appliquée*, Victor Masson, Langlois et Leclercq, Paris (nombreuses éditions).

*Delambre J.B.J., Méchain P.A. (1806-1810) *Base du Système métrique décimal* : voir Méchain.

Delambre J.B.J. (1817) *Tables Écliptiques des Satellites de Jupiter d'après la Théorie de M. le Marquis de Laplace, et la totalité des observations faites depuis 1662 jusqu'à l'an 1802*, Courcier, Paris.

*Delambre J.B.J. (1912) *Grandeur et Figure de la Terre*, ouvrage [posthume] augmenté de notes, de cartes et publié par les soins de G. Bigourdan, Gauthier-Villars, Paris.

*Euler L. (1746) *Nova theoria lucis et colorum*, in *Opera Omnia*, Basel (1911- 1956).

*Euler L. (1761) *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie*, réed. Presses polytechniques et

universitaires romandes, Lausanne, 2003 : accessible sur <http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/273/>

*Figuier L. (s.d., ca.1870) *Les Merveilles de la Science*, 4 Vol., Furne, Jouvet et Cie, Paris.

*Flammarion C. (1880) *Astronomie populaire*, Marpon et Flammarion, Paris, Rééd. Flammarion, Paris (2002).

*Flammarion C. (1892) *Astronomie élémentaire*, Bibliothèque scolaire de la ligue franco-américaine de l'enseignement, Paris.

Foucault L. (1878) *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, ed. par Gariel C.-M., Gauthier-Villars, Paris, Rééd. fac-similé Librairie Albert Blanchard, Paris (2001).

(*Fresnel A. (1866, 1868, 1870) *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, publiées par MM. Henri de Senarmont, Verdet et Léonor Fresnel, Paris, Imprimerie impériale, 3 tomes. Seul le t. 2 est accessible par Gallica.

(*Galilée (1633-1637) *Discours concernant deux sciences nouvelles ...* Trad. M. Clavelin, Presses Universitaires de France, Paris (1995). Seule l'édition italienne des œuvres complètes est accessible par Gallica.

Gauss C. F., Weber W. (1840) *Atlas des Erdmagnetismus nach den Elementen des Theorie entworfen*, Weidmann, Leipzig.

*Gay-Lussac J., Thenard L.-J. (1811) *Recherches physico-chimiques, faites à l'occasion de la grande batterie voltaïque donnée par S.M.I. et R. à l'École polytechnique*, 2 vol., Deterville, Paris, accessible sur <http://cnum.cnam.fr>

*Herschel J.F.W. (1829-1833) *Traité de la lumière*, trad. Werhulst P.-F., Quetelet A., 2 vol. Mahler, Paris.

Herschel J.F.W. (1847) *Results of astronomical observations made during the years 1834*, 5, 6, 7, 8 at the Cape of Good Hope, Smith Elder and Co, London.

*Herschel J.F.W. (1853) *Nouveau manuel complet d'astronomie*, trad. A.-D. Vergnaud, Roret, Paris.

*Hooke R. (1665) *Micrographia...*, John Martyn, James Allestry, London, p. 55 ; Réédition en 1987, Science Heritage Ltd., Londres, et autres en fac-similé.

*Hugo V. (1848) *Choses vues*, rééd. Gallimard, Paris (2002).

*Hugo V. (1863) *Promontorium Somnii*, ed. critique par René Journet et Guy Robert (1961), *Annales Littéraires de l'Université de Besançon*, Vol. 42, Les Belles Lettres, Paris ; le texte original est accessible par Gallica, voir « Proses philosophiques de 1860-65 ».

*Hugo V. (1863a) *Napoléon le petit*, W. Jeffs, Londres.

*Humboldt A. de (1816) *Voyage aux régions équinoxiales du nouveau continent*, 4 t., Schoell, Paris, et Librairie grecque – latine – allemande, Paris.

*Humboldt A. de (1846-1851) *Cosmos, Essai d'une description physique du monde*, traduit par H. Faye et Ch. Galusky, 4 vol., Gide et Baudry, Paris ; rééd. Éditions Utz, Paris (2006). Les éditions allemande et française sont toutes deux accessibles par Gallica.

*Huygens C. (1690) *Traité de la lumière*, vol. XIX des *Œuvres complètes*, p. 451-550, Nijhoff, La Haye (1888-1950) ; accessible sur <http://www.musees-franchecomte.com/index.php?p=626>

*Huygens C. (1698) *Kosmotheoros*, vol. XXI des *Œuvres complètes*, Nijhoff, La Haye (1888-1950).

*Jamin J.-C. (1858-1866) *Cours de Physique de l'École polytechnique*, 3 Vol., Mallet-Bachelier, Paris.

*Lambert J. H. (1760) *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*, Eberhardi Klett, Augsburg ; *Photometry, or on the measure and gradations of light, colors and shade*, trad. anglaise par DiLaura D. L., The illuminating Engineering Society of North America (2001) ; *Photométrie, ou de la mesure et de la gradation de la lumière, des couleurs et de l'ombre*, trad. française par Boye J., Conty J. et Saillard M., L'Harmattan, Paris (1997). Original latin accessible par <http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/42/>

*Lamé, G (1840) *Cours de physique de l'École polytechnique*, 3 t., Bachelier, Paris.

*Laplace P. S. (1796) *Exposition du système du Monde*, de l'Imprimerie du Cercle social ; éd. rév. en 1799, 1808 (chez Courier),

1813 (Mme Vve Courier), 1824 et 1836 (Bachelier). Cette dernière est accessible par Gallica en mode texte.

Larousse P. : *Grand dictionnaire universel du XIX^e siècle*, 24 vol. et suppléments, rééd. Lacour, Nîmes, 1990.

*Lavoisier A.-L. de : *Ceuvres de Lavoisier*, 6 vol., Imprimerie impériale (1862-1893).

*Lavoisier A.-L. de (1790) *Traité élémentaire de chimie*, reproduit dans *Ceuvres de Lavoisier*, t. 2, Imprimerie impériale, Paris, 1864 ; aussi Ed. Culture et civilisation, Bruxelles, 1965, accessible par <http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/199/> et <http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/200/>

Mascart E. (1889-1893) *Traité d'Optique*, 3 t., Gauthier-Villars, Paris.

*Maxwell J.-C. (1885) *Traité d'électricité et de magnétisme*, trad. Séligman-Lui G., 2 vol., Gauthier-Villars, Paris.

*Méchain P.F.A., Delambre J.B.J. (1806-1810) *Base du Système métrique décimal, ou mesure de l'arc du méridien compris entre les parallèles de Dunkerque et Barcelone, exécutée en 1792 et années suivantes*, 3 vol., Baudouin [Paris].

*Newton I. (1687) *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Nombreuses éditions postérieures ; traduction française de l'édition de 1726 : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, par feuë Madame la Marquise du Chastellet, chez Desaint et Saillant, Paris (1759), aussi J. Gabay, Paris (1990). Original accessible par <http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/73/> ; Original et traduction accessibles par Gallica.

*Newton Isaac (1704) *Optice sive de reflexionibus, inflexionibus et coloribus*, impensis S. Smith et B. Walford. Nombreuses éditions postérieures ; traduction française (1720) : *Traité d'optique sur les réflexions, réfractions et les couleurs de la lumière*, par M. Coste, chez P. Humbert ; *2^e édition en 1722, chez Montalant.

*Trad. Marat, Leroy, Paris (1787) ; édition de 1720 accessible sur <http://www.musees-franchemonte.com/index.php?p=626>

Prony F.M. Riche de (1791) *Description des opérations faites en Angleterre pour déterminer les positions respectives des Observatoires de Greenwich et de Paris*, Firmin-Didot, Paris.

*Proudhon P.J. (1846) *Système des contradictions économiques ou philosophie de la misère*, Librairie internationale, Paris (l'édition de 1872 est accessible par Gallica).

Rayet G. (1887) *Notes sur l'histoire de la photographie astronomique*, Gauthier-Villars, Paris.

*Secchi A. (1875 et 1877) *Le Soleil*, 2 t., Gauthier-Villars, Paris.

*Tyndall J. (1868) *Faraday as a discoverer*, nombr. rééd. Accessible gratuitement sur http://emotionalliteracyeducation.com/classic_books_online/fdayd10.htm

Wells W.C. (1817), *Essai sur la rosée, et sur divers Phénomènes qui ont des rapports avec elle*. Traduit de l'anglais sur la 2^e édition, par Aug. J. Tordeux, Crochard, Paris. Une édition anglaise posthume de 1818 est accessible sur Google sous le nom d'*Essay on dew*.

Whewell W. (1847) *History of inductive sciences*, 2^e édition, Londres.

*Young T. (1807) *A course of lectures on natural and experimental philosophy*, Royal Institution, Londres.

Autres ouvrages consultés

Adler K. (2004) *Mesurer le monde : l'incroyable histoire de l'invention du mètre*, trad. M. Devillers-Argouarc'h, Flammarion, Paris.

Andriess C.D. (1998) *Christian Huyghens, Biographie*, Albin Michel, Paris.

Anonyme (1930) *Le Système métrique décimal*, Gauthier-Villars, Paris.

Bigourdan G. (1928-1932) *Le Bureau des longitudes : son histoire de l'origine à ce jour*, in *Annuaire du Bureau des longitudes pour 1928* p. A.1-A.72 ; 1929, p. C.1-C.92 ; (1930) p. A.1-A.110 ; 1931 p. A.1-A.151 ; 1932 p. A.1-A.91.

Blondel C. (1982) *A.-M. Ampère et la création de l'électrodynamique (1820-1827)*. Éditions du CTHS, Paris.

Boistel G. (2008) *Une histoire de la Connaissance des temps, 1679-1903*, EDP Sciences, à paraître.

- Boudenot J.C. (2005) *Comment Branly a découvert la radio*, EDP Sciences, les Ulis. On y trouve un excellent texte ([Boudenot J.-C.] *Ampère au cœur de la physique du début du XIX^e siècle*), que l'on peut télécharger depuis <http://www.see.asso.fr/htdocs/main.php.congresjourneespasseses.php/278>
- Botting D. (1988) *Humboldt, un savant démocrate*, Belin, Paris.
- Caron F. (1997) *Histoire des chemins de fer en France*, t. 1 (1740-1883), Fayard, Paris.
- Caron J.C. (2002) *La France de 1815 à 1848*, Armand Colin, Paris.
- Chappert A. (1977) *Étienne Louis Malus*, Vrin, Paris.
- Clément A., Thomas G., dir. (2001) *Atlas du Paris souterrain*, Parigramme, Paris.
- Danjon A. (1946) La découverte de Neptune, *L'Astronomie*, p. 255-278.
- Darrigol O. (2003) *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford University Press, Oxford.
- Debyser J. (2007) *Un nouveau regard sur la Nature ; temps, espace et matière au Siècle des Lumières*, EDP Sciences, Paris.
- Dupont J.-Y. (2000) Le cours de machines de l'École polytechnique, de sa création jusqu'en 1850, *SABIX (Bulletin de la Société des Amis de la Bibliothèque de l'École polytechnique)* N° 25, p. 1-101.
- Eisenstaedt J. (2005) *Avant Einstein, Relativité, lumière, gravitation*, Éditions du Seuil, Paris.
- Encrenaz T. et al. (2003) *Le Système solaire*, CNRS Éditions et EDP Sciences, Les Ulis.
- Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M. (1964) *The Feynman lectures on physics*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, Edition bilingue français-anglais (1979-1970) chez le même éditeur.
- Fichou J.-C., Le Hénaff N. & Mével X. (1999) *Phares, histoire du balisage et de l'éclairage des côtes de France*, Le Chasse-Marée Armen, Douarnenez.
- Fierro A. (1991) *Histoire de la météorologie*, Denoël, Paris.
- Frankel E. (1976) *Corpuscular Optics and the Wave Theory of Light : The Science and Politics of a Revolution in Physics, Social Studies of Science*, 6, p. 141-184.
- Gagneux R., Prouvost D. (2004) *Sur la trace des enceintes de Paris*, Éd. Parigramme, Paris.
- Garrigues J. (2002) *La France de 1848 à 1870*, Armand Colin, Paris.
- Gary C. (1994) *La foudre, des mythologies antiques à la recherche moderne*, Masson, Paris.
- Gayet M. (2006) *Alexandre de Humboldt, le dernier savant universel*, Vuibert, Paris.
- Gillispie C.C., ed. (1970-1990) *Dictionary of scientific biography*, 18 vol., American Council of Learned Societies, C. Scribner's sons, New York.
- Guedj D. (1997) *La méridienne*, Robert Laffont, Paris.
- Guedj D. (2000) *Le mètre du monde*, ed. du Seuil, Paris.
- Hakfoort C. (1995) *Optics in the age of Euler*, Cambridge University Press.
- Institut de France (1979) *Index bibliographique des membres et correspondants de l'Académie des sciences 1666-1978*, Paris, Gauthier-Villars (voir aussi http://www.academie-sciences.fr/membres/in_memoriam/in_memoriam_liste_alphabetique.htm)
- Javelle J.-P., Rochas M., Pastre C., Hontarrède M., Beaurepaire M., Jacomy B. (2000) *La météorologie, du baromètre au satellite*, Delachaux et Niestlé, Lausanne.
- Fabry Ch. (1938) *La vie et l'œuvre scientifique d'Augustin Fresnel*, article inséré dans *La vie et l'œuvre de Charles Fabry, Œuvres choisies publiées à l'occasion du jubilé scientifique de M. Charles Fabry*, Gauthier-Villars, Paris, 1938.
- Lagrée M. (2003) *Religion et modernité, France 19^e et 20^e siècles*, Presses universitaires de Rennes, Rennes.
- Lamy J. (2006) *La politique instrumentale du Bureau des Longitudes au 19^e siècle : formes de gestion du capital technique*, à paraître.
- Lantos P. (1997) *Le Soleil en face*, Masson, Paris.
- Lequeux J. (2005) *L'Univers dévoilé*, EDP Sciences, Les Ulis.
- Levallois J.-J. (1988) *Mesurer la Terre – 300 ans de géodésie française*, École des Ponts et

Chaussées/Association Française de Topographie, Paris.

Pannekoek A. (1989) *A History of Astronomy*, Dover, New York.

Picolet G., éd. (1987) *Jean Picard et les débuts de l'astronomie de précision au XVIII^e siècle*, Éditions du CNRS, Paris.

Picon A. (1988) *Claude Perrault (1613-1688), la curiosité d'un classique*, Picard, Paris.

Repsold J. A. (1908, 1914) *Zur Geschichte der astronomischen Messwerkzeuge* ; Vol. 1 : *von Purbach bis Reichenbach, 1450 bis 1830* ; Vol. 2 : *von 1830 bis um 1900*, Reinicke, Leipzig, rééd. Gerhard Sauer, Köln (2004).

Revue du Musée des arts et métiers, N° 39/40 (septembre/décembre 2003) : Humboldt et Bonpland, 1799-1804, une aventure savante aux Amériques.

Ronchi V. (1956) *Histoire de la lumière*, trad. J. Taton, Librairie Armand Colin, Paris ; réimpression Jacques Gabay, Paris (1996).

Rosmorduc J.V., Dutour F. (2004) *Les révolutions de l'optique et l'œuvre de Fresnel*, Vuibert, Paris.

Ruju P.A.M., Mostert M. (1995) *The life and times of Guglielmo Libri*, 1802-1869, Verloren Pub., Hilversum.

Pairault F. (2000) *Gaspard Monge*, Taillandier, Paris.

Sterken C., Staubermann K. (2000) *Karl Friedrich Zöllner and the historical dimension of astronomical photometry*, VUB University Press, Bruxelles.

Tobin W. (2002) *Léon Foucault*, EDP Sciences, Les Ulis.

Toulotte M. (1993) *Étienne Arago (1802-1892) ; une vie, un siècle*, Publications de l'Olivier, Perpignan.

Trystram F. (1979) *Le procès des étoiles*, ed. Seghers, Paris.

Vaucouleurs G. de (1958) *La photographie astronomique*, Albin Michel, Paris.

Wolf C. (1902) *Histoire de l'Observatoire de Paris de sa fondation à 1793*, Gauthier-Villars, Paris.

Quelques sites Internet utiles :

<http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080>

<http://cdsads.u-strasbg.fr>

<http://cnum.cnam.fr>

<http://gallica.bnf.fr>

<http://expositions.obspm.fr/>

<http://www.academie-sciences.fr>

<http://www.ampere.cnrs.fr> (on y trouve une histoire de l'électricité au XIX^e siècle)

<http://www.bibliotheque.polytechnique.fr/centrehistorique.objet.htm>

<http://www.obspm.fr/histoire/acteurs>

<http://www.polytechnique.fr/institution>

Index

A

Abbot, Charles G. (1872-1973), 327
Aberration, 124-125, 132, 135, 136, 148
Académie des sciences (ou Première classe de l'Institut), 1, 2, 3-7, 15, 19, 20, 21, 28, 43-45, 52, 53, 68, 75, 97, 102, 111, 129, 224, 295, 344, 371, 384, 386-389, 391, 415, 420-421, 442-443, 446, 451, 455
Adams, John Couch (1819-1892), 259
Airy, George Bidell (1801-1892), 118, 133, 221, 254, 259, 297, 313
Aitkin, 396
Albert, Alexandre Martin dit (1815-1895), 60, 65
Alexander, 180
Allcard, William (1809-1861), 411
Ampère, André-Marie (1775-1836), v, 19, 21, 23, 26, 46, 49, 59, 113, 114, 120, 121, 134, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 178, 180, 340, 374, 387, 453, 455
Amphithéâtre de l'Observatoire, 244-248, 261, 380-381
Annales de chimie et de physique, 25-26, 27, 52, 319
Annuaire du Bureau des longitudes, 24-25, 52, 69, 261, 390-391
Arago, Alfred (1815-1892), 34, 383
Arago, Bonaventure (1754-1814), 30
Arago, Emmanuel (1812-1896), 33, 60, 62, 65, 67, 70, 71, 249, 383
Arago, Étienne (1802-1892), 32, 33, 53, 62, 65, 67, 70, 71, 73, 248, 448
Arago, Gabriel (1816-1832), 34, 55
Arago, Jacques (1790-1854), 31

Arago, Jean (1788-1836), 31
Arago, Joseph (1796-1860), 32
Arago, Lucie née Carrier-Besombes (1788-1829), 45, 52
Arago, Marguerite (1798-1859), 32, 250, 383
Arago, Marie-Rose (1782-1832), 31, 55
Arago, Victor (1792-1867), 32
Arc-en-ciel, 90, 477-478
Archer, F., 423
Argand, Aimé (?-1803), 364
Aristote (384-322 av. J.-C.), 115
Arnoux, Jean-Claude (1798-1866), 411, 414, 415
Arrhenius, Svante (1859-1927), 294
Astronomie populaire d'Arago, 69, 381-383, 387, 461
Astrophysique, 266, 285, 290, 314, 451, 456
Aumale, duc d' (1822-1897), 415
Aurore boréale, 315, 339-340, 477
Avogadro, Amedeo (1776-1856), 160

B

Babbage, Charles (1792-1871), 172, 173
Babinet, Jacques (1794-1872), 98, 118, 166, 249, 260, 287, 351, 398
Bacelli, Giovanni (1784-1835), 172
Bailly, Étienne-Marin (1796-1837), 286
Bailly, Jean-Sylvain (1736-1793), v, 346, 387, 388, 391
Baize, Paul (1901-1995), 243
Balzac, Honoré de (1799-1850), 427
Barbès, Armand (1809-1870), 33, 66
Barlow, Peter (1776-1862), 168, 169, 340
Barral, Jean-Augustin (1819-1884), 69, 70, 115, 175, 296, 298, 314, 317, 328, 329,

- 338, 360, 363, 382, 383, 443, 447, 455, 485
- Barrot, Odilon (1791-1873), 55
- Bartholin, Erasme (1625-1698), 94
- Bartholony, François, 411
- Baudin, Amiral Charles (1784-1854), 65, 443
- Bayard, Hippolyte (1807-1887), 419
- Beau de Rochas, Alphonse Eugène (1815-1893), 402
- Becquerel, Antoine-César (1788-1878), 178, 179
- Becquerel, Edmond (1820-1891), 122, 178, 424
- Becquey, 365
- Beechey, captain Frederic-William (1796-1856), 475
- Bellet, 219, 237
- Berkowski, 425
- Berlioz, Auguste, 186
- Bernard, Claude (1813-1878), 447
- Bernard, général Simon (1779-1839), 431
- Bernoulli, Daniel (1700-1782), 398, 418
- Berry, duc de (1778-1820), 54
- Bert, Paul (1833-1886), 58
- Berthelot, Marcellin (1827-1907), 447
- Berthollet, Amédée (?-1811), 8
- Berthollet, Claude (1748-1822), 8, 13, 17, 18, 19, 25, 26, 52
- Berthoud, Ferdinand (1727-1807), 198, 230
- Bertrand, Joseph (1822-1900), 446
- Bessel, Friedrich Wilhelm (1784-1846), 143, 145, 256, 277, 278, 279, 292, 294
- Bibliothèque nationale, 429**
- Bibliothèque universelle de Genève, 26, 27*
- Biermann, Ludwig (1907-1986), 294
- Biet, Léon Marie Dieudonné (1785-1856), 237
- Bigourdan, Guillaume (1851-1932), vi, 214, 237, 485
- Binet, Jacques (1786-1856), 45
- Bingham, 423
- Biot, Édouard (1803-1850), 405
- Biot, Jean-Baptiste (1774-1862), 8, 26, 36, 38, 44, 45, 48, 50, 73, 97, 99, 101, 111, 112, 118, 128, 140, 160, 163, 164, 191, 195, 208, 209, 210, 211, 213, 354, 358, 359, 360, 362, 405, 421, 482, 483
- Bird, John (1709-1776), 130, 230
- Bixio, Jacques-Alexandre (1808-1865), 317, 329
- Black, 426
- Blagden, Charles (1748-1820), 479
- Blair, Robert (1748-1828), 130
- Blanc, Louis (1811-1882), 60, 63, 66
- Blanqui, Louis Auguste (1805-1881), 66
- Blount, Edward, 411
- Bode, Johann-Ebert (1747-1826), 284, 285
- Boistel, 485
- Bonaparte (1769-1821), 5, 13, 14, 19, 63
- Bonaparte, Louis Napoléon (1808-1873), 33, 34, 66, 67
- Bonaparte, Princesse Mathilde (1820-1904), 34
- Bond, George Phillips (1825-1865), 426
- Bond, William Cranch (1789-1859), 426
- Bonne (colonel), 215, 216, 218
- Bonpland, Aimé (1773-1858), 42, 49
- Bontemps, Georges (1799-1883), 243
- Borda, Charles de (1733-1799), 36, 195, 196, 200, 201, 202, 204, 205, 206, 209, 210, 219, 221, 226, 358, 364, 365, 367, 479
- Boscovich, Rudjer (1711-1787), 130, 133
- Bouguer, Pierre (1698-1758), 194, 206, 245, 295, 296, 297, 298
- Bourbouze (1826-?), 185
- Bourdalouë, Paul-Adrien, 217
- Bourgois, amiral Siméon (1815-1887), 418
- Boussingault, Jean-Baptiste Joseph (1802-1887), 473
- Boussole, 330, 339, 470**
- de déclinaison, 331-332**
- d'inclinaison, 334-335**
- des intensités, 334-335**
- de variations diurnes, 333-334**
- Bouvard, Alexis (1767-1843), 11, 51, 52, 232, 248, 255, 256, 257, 274, 293, 318, 320, 373
- Bouvard, Eugène, 254, 257, 293, 455
- Bouvard, Joseph-Marie, 319
- Bradley, James (1693-1762), 125, 148
- Breguet, Abraham (1747-1823), 143
- Breguet, Louis (1804-1883), 21, 123, 143, 144, 145, 153, 182, 186, 221, 237, 241, 373, 385, 447
- Brewster, David (1781-1868), 96, 97, 98, 103, 172, 339, 350, 370
- Brogie, Louis de (1892-1987), 455
- Brooke, 336
- Brossier (colonel), 217
- Brougham, Lord, Henry (1778-1868), 93
- Brousseau (colonel), 217
- Brunner, Johann (1804-1862), 222, 240, 241, 242, 243, 262

- Buache de la Neuville, Nicolas (1741-1825), 10
- Buddicom, William Barber (1816-1887), 379, 396, 411
- Buffon, Georges-Louis Leclerc, comte de (1707-1788), 346, 347, 348, 367
- Buisson, Henri (1873-1944), 273
- Bulletin des sciences*, 8, 25-26
- Bunsen, Robert Wilhelm (1811-1899), 285
- Burdin, 433
- Bureau des longitudes**, 2, 8-12, 21, 24, 40, 48, 51, 211, 221, 233, 237-238, 243-244, 261, 271-272, 277, 326-327, 349, 371, 380, 443, 451
- Bürg, Johann Tobias (1766-1834), 28
- Busch, August (1804-1855), 425
- C**
- Cabinet d'observation**, 228-229, 237, 239, 333
- Callon, 434
- Cameron, Margaret (1815-1879), 301
- Camus, Charles (1699-1768), 194
- Candolle, Augustin Pyrame de (1778-1841), 8, 158, 159
- Canivet, 230
- Carcel, 366, 367
- Carnot, Lazare (1753-1823), 5, 387, 388
- Carnot, Sadi, 393
- Carnot, Sadi (1796-1832), 387, 393, 395, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 455
- Caron, Jean-Claude, 30
- Carroché (?-1813), 231, 232, 237, 274
- Cartographie**, 196-199, 216, 217-219
- Cassini I, Jean-Dominique (1625-1712), 79, 125, 147, 194, 198, 224, 225, 245, 247, 251, 269, 312, 477
- Cassini II, Jacques (1677-1756), 194, 195, 199, 275
- Cassini III, César François dit de Thury (1714-1784), 195, 199, 200, 371
- Cassini IV, 485
- Cassini IV, Jean Dominique (1748-1845), 5, 10, 199, 200, 210, 224, 230, 232, 237, 319, 330, 331, 332, 336, 338, 339, 485
- Castel, Père Louis-Bertrand (1688-1757), 85
- Cauchoix, Robert Aglaé (1776-1845), 233, 234, 237, 239, 252, 263, 404
- Cauchy, Augustin (1789-1857), 118
- Cavaignac, Louis-Eugène (1802-1857), 67, 68
- Cavaillé-Coll, Aristide (1811-1899), 151
- Cavé, François (1794-1875), 404
- Celsius, Anders (1701-1744), 317
- Cercle méridien**, 219, 222, 226, 229, 230, 233, 237-238, 248, 254, 262, 271
- Cercle répétiteur**, 131, 200-204, 208-210, 213, 215, 217, 219, 221, 226, 233, 274, 277, 358, 389, 479
- Chabrol de Volvic, Gilbert Joseph Gaspard (1773-1843), 344
- Chaix, 38, 209
- Chaleur**, 119-121, 344-349, 397-399, 473
- Challis, James (1803-1882), 136, 259
- Chambre des députés** 54-58, 67, 384-386, 407-410, 414, 422, 427-428, 430, 431, 433, 445
- Chappe, Claude (1763-1805), 179
- Charcot, Jean-Baptiste (1867-1936), 354
- Charité, 230
- Charles X (1757-1836), 53, 54, 121
- Charles, Jacques Alexandre César (1746-1823), 230
- Chartran, Théobald (1849-1907), 381
- Chateaubriand, François-René de (1768-1848), 59
- Châtelet, Gabrielle Émilie, Marquise du (1706-1749), 267
- Chaux, mortiers et ciments**, 384, 426-428
- Chemin de fer**, 60, 216-217, 384, 405-416, 445, 447, 453
- atmosphérique**, 411-414
- système Arnoux**, 414-415
- Chenavard, Paul-Joseph (1808-1895), 445, 446
- Chevalier, Charles (1808-1895), 423
- Chevalier, Michel (1806-1879), 446
- Clairaut, Alexis-Claude (1713-1765), 194, 195, 196, 245, 266, 267
- Clapeyron, Émile (1799-1864), 406
- Clarke, Henry Hyde (1815-1895), 186, 187
- Clausius, Rudolph (1822-1888), 399
- Clegg, 413, 414
- Clemandot, 263
- Colbert, Jean-Baptiste (1619-1683), 3, 79, 225
- Colby, captain Thomas (1784-1852), 213, 368
- Collège de France**, 2, 160, 429
- Collet-Descotils, Alphonse-Victor (1773-1815), 8
- Combes, Charles (1801-1872), 442
- Combes, Michel, 251

- Comète, 234, 236, 255, 266, 272, 292-294, 426, 450, 470
- Comptes rendus des séances hebdomadaires de l'Académie des sciences*, 24, 35, 58, 319
- Condorcet, Marie Jean Caritat de (1743-1794), v, 12, 59, 62, 63, 367, 387, 388, 454
- Connaissance des temps*, 9, 23-24, 27, 255, 261, 318, 389-390
- Conseil général de la Seine, 54, 428, 442
- Conservatoire des arts et métiers, 2, 47, 430
- Constant, Benjamin (1767-1830), 23
- Constante solaire, 327
- Cope, Thomas D., 106
- Coriolis, Gustave Gaspard (1792-1830), 323
- Cornu, Alfred (1841-1902), 152, 153, 154, 243, 451
- Costabel, 134
- Coulomb, Charles (1736-1806), 17, 165, 330, 336, 454, 485
- Coupole astronomique, 223, 240-243
- Courant marin, 350-354, 479-481
- Cours public d'astronomie, 380-381, 391, 445
- Cox, Stevens, 418
- Crampton, Thomas Russell (1816-1888), 405
- Crémieux, Adolphe (1796-1880), 61
- Creyssac, 35
- Cruikshank, William (1746-1808), 156
- Cuillandre, Jean-Charles, 275
- Curie, Marie (1867-1934), 455
- Curie, Pierre (1859-1906), 455
- Cuvier, Georges (1769-1832), 3, 7, 19, 20, 53, 454
- Cyanomètre, 101
- D**
- d'Abbadie, Antoine (1810-1897), 288
- d'Alembert, Jean le Rond (1717-1783), 195, 196, 245, 267
- d'Arrest, Heinrich Louis (1822-1875), 258
- Daguerre, Louis-Mandé (1787-1851), 1, 298, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 427
- Dallery, Charles (1710-1780), 418
- Dallery, Thomas Charles Auguste (1754-1835), 418
- Danjon, André (1890-1967), 258, 266, 453, 454, 455
- Daumas, Maurice (1910-1984), iv, 30, 124, 210, 266, 454, 485
- David d'Angers, Pierre-Jean (1788-1856), 31, 59, 63, 445
- Davy, Humphry (1778-1829), 51, 156, 158, 168, 420, 480
- Davy, John (1790-1868), 480
- de la Rive, Auguste (1801-1873), 26, 178
- de la Rive, Charles Gaspard (1770-1834), 26, 50, 158, 159, 168, 178
- de la Rue, Warren (1815-1889), 425, 426
- Débarbat, Suzanne, vii, 251
- Debyser, Jacques, 454, 485
- Delacroix, Eugène (1798-1863), 33
- Delambre, Jean-Baptiste Joseph (1749-1822), 3, 10, 24, 25, 28, 44, 45, 129, 148, 160, 194, 203, 204, 206, 211, 213, 216, 217, 219, 245, 249, 256, 269, 359, 373, 389, 454, 455
- Delamétherie, Jean-Claude (1743-1817), 25, 27, 28, 119, 268, 318
- Delaroche, Paul (1797-1856), 422, 423
- Delaunay, Charles (1816-1872), 257, 259, 261, 393, 434, 456
- Descartes, René (1596-1650), 76, 79, 80, 90, 477, 478
- Deslandres, Henri (1853-1948), 456
- Dhombres, vi, 266
- Diabète d'Arago, 32, 55, 69, 71, 143, 261, 391, 444
- Dibbets, Jan, 454
- Discours d'Arago, 38, 54-58, 60, 384-388, 403, 404, 407
- Dollond, John (1706-1761), 127, 227, 230, 233, 234, 274
- Donné, Alfred (1801-1878), 6
- Doppler, Christian (1803-1853), 135, 136
- Draper, Henry (1837-1882), 425, 426
- Draper, John William (1810-1882), 425
- Duban, Félix (1797-1870), 445
- Duboscq, Jules (1817-1886), 362, 463, 464
- Duc d'Angoulême, Louis Antoine de Bourbon (1775-1844), 233
- Ducrotay de Blainville, Henri-Marie (1777-1850), 25
- Dulong, Pierre-Louis (1785-1838), vi, 3, 8, 26, 50, 357, 361, 374, 375, 376, 377, 396
- Dumas, Alexandre (1802-1870), 53, 443
- Dumont d'Urville, Jules Sébastien César (1790-1842), 316, 408

Duperrey, capitaine Louis-Isidore (1786-1865), 342, 343, 351, 352
 Dupin, Charles (1784-1873), 396, 402
 Dupont de l'Eure, Jacques Charles (1767-1855), 61
 Dupuy de Lôme, Henri (1816-1885), 417
 Duroy, 198
 Dusommerard, Alexandre (1779-1842), 430
Dynamo, 188-189

E

Éclimètre, 219, 221
Éclipse
 de Soleil, 254, 257, 287-288, 424-425
 de Lune, 197
Écoles centrales, 2, 14, 18
École centrale des arts et manufactures, 47
 École d'artillerie 13, 21, 432
Écoles des arts et métiers, 2, 430-431
 École des mines, 2, 13
École des ponts et chaussées, 2, 12, 13, 102, 108
École du génie, 96
 École normale supérieure, 2, 14-15, 344
École polytechnique, 2, 12-14, 19, 21, 35-36, 45-47, 96, 102, 156, 160, 249, 336, 386, 391-392, 442, 447
Écueil (marin), 350, 481
Effet de serre, 326-327
Électrochimie, 157, 168, 176
 Eichens, Friedrich Wilhelm (1820-1884), 243
 Einstein, Albert (1879-1955), 80, 124, 139, 455, 456
Électromagnétisme, 155-189, 340
 action mutuelle de courants, 161-163, 165
 aimant, aimantation, 162, 165, 176
 champ magnétique, 159, 164, 168, 169-170, 174, 176-178, 342-333
 déviatioin d'un aimant, 49, 158
 électroaimant, 50, 51, 166-167, 174, 180
 induction, 50, 168, 173
 magnétisme de rotation, 50, 170-176, 336
 Élie de Beaumont, Léonce (1798-1879), 68, 347
 Encke, Johann Franz (1791-1865), 148, 292

Entrecasteaux, Antoine d' (1737-1793), 475
 Eratosthène (284-192 av. J.-C.), 192
 Ericsson, John (1803-1889), 400, 401
 Espy, 327
Estagel (Pyrénées-orientales), 30, 31, 59, 249, 445-447, 457
Éther, 80-81, 87, 112, 114, 115, 116, 134-135, 136, 138-140, 291
Étoile, 128, 269, 289-292, 301-307, 312-314, 426, 454
 catalogue, 271, 272, 304
 double, 239, 255, 268, 273, 277, 289-292
 filante, 476
 Euler, Leonhard (1707-1783), 35, 84, 85, 88

F

Fabry, Charles (1867-1945), v, 273
 Fahrenheit, Daniel Gabriel (1686-1736), 317
 Faraday, Michael (1791-1867), 50, 81, 159, 167, 168, 169, 170, 171, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 183, 185
 Fatio de Duiller, Nicolas (1664-1753), 477
 Faucett, 417
 Faye, Hervé (1814-1902), 222, 256, 279, 426
 Fernel, Jean (1497-1558), 192
 Ferrel, 323
 Ferry, Jules (1832-1893), 448
 Fitz-Roy, captain Robert (1805-1865), 482
 Fizeau, Hippolyte (1819-1896), 20, 50, 70, 92, 122, 123, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 145, 146, 149, 150, 151, 152, 153, 185, 298, 299, 327, 362, 363, 423, 425
 Flachet, Eugène (1802-1873), 406, 414
 Flachet, Stéphane (1800-1884), 406
 Flammarion, Camille (1842-1925), 286, 383
 Flauguergues, Honoré (1755-1835), 10
 Flocon, Ferdinand (1800-1866), 61
 Flourens, Pierre (1794-1867), 3, 443
 Folgen, Timothy, 351
 Fontaine, Hippolyte (1833-1910), 188
 Fontaine-Baron, 434
 Fontenelle, Bernard le Bovier de (1657-1757), 383
 Fonveille, Wilfrid de (1824-1914), 452, 453
Fortifications, 431-432, 433, 453
 Fortin, J. (1750-1831), 130, 131, 209, 230, 233, 237, 272, 274, 277, 319, 358

- Foucault, Léon (1819-1868), v, vii, 6, 14, 15, 20, 50, 70, 92, 122, 135, 143, 144, 145, 146, 151, 152, 153, 174, 227, 236, 244, 273, 298, 299, 327, 425, 454, 456
- Fourcroy, Antoine François de (1755-1809), 12, 17
- Fourier, Joseph (1768-1830), v, 3, 15, 26, 45, 114, 119, 121, 178, 325, 326, 343, 344, 345, 346, 347, 387, 388, 455
- Fourneyron, Benoît (1802-1867), 433, 434, 435
- Foy, Alphonse (1796-1888), 182
- François I^{er} (1494-1547), 2
- François jeune, 368
- Franklin, Benjamin (1706-1790), v, 112, 350, 351, 479
- Fraunhofer, Joseph von (1787-1826), 107, 107, 122, 239, 278, 299
- Frédéric-Guillaume III (1770-1840), 251
- Fresnel, Augustin (1788-1827), v, 8, 19, 26, 49, 52, 53, 59, 75, 80, 82, 84, 89, 92, 97, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 160, 162, 167, 170, 214, 267, 295, 308, 349, 361, 362, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 386, 387, 388, 451, 453, 454, 455, 466
- Fresnel, Léonor (1790-1869), 102, 110
- Fresnel, Louis, 102
- Frisius (1508-1555), 192
- Froment, Paul-Gustave (1815-1865), 20, 144, 149, 151, 155, 182, 184, 185, 186
- Fulton, Robert (1765-1815), 416
- Funérailles d'Arago, 442-443**
- G**
- Galaxie, 273**
des Chiens de chasse (M 51), 273, 275
- Galilée, Galileo Galilei (1564-1642), 146, 198, 276, 297
- Galle, Johann Gottfried (1812-1910), 257, 258, 260
- Galvani, Luigi (1737-1798), 161
- Galvanomètre, 161, 175**
- Gambart, Adolphe (1800-1836), 255
- Gambey, Henri Prudence (1787-1847), 8, 137, 138, 139, 200, 214, 217, 219, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 247, 252, 255, 262, 272, 276, 331, 332, 333, 334, 373, 430, 463, 464, 475
- Garnier-Pagès, Louis-Antoine (1803-1878), 61, 65, 410
- Garraud, Gabriel Joseph (1807-1880), 245
- Garrigues, Jean, 30
- Gassendi, Pierre (1592-1655), 312, 371
- Gaucheraud, Henri, 421
- Gauss, Carl Friedrich (1777-1855), 180, 336, 342, 343
- Gautier, Jean-Alfred (1793-1881), 233, 234, 482
- Gay-Lussac, Louis Joseph (1778-1850), 8, 32, 45, 50, 52, 59, 68, 111, 119, 157, 256, 358, 360, 373, 387, 388
- Gengembre, 404
- Geoffroy Saint-Hilaire, Étienne (1772-1844), 19
- Germain, Sophie (1776-1831), 2
- Gilbert, William (1544-1603), 340
- Girard, Pierre-Simon (1765-1836), 45, 374, 434
- Gisors, Henri Alphonse de (1796-1861), 223, 240, 241, 245, 246
- Global Positioning System (GPS), 212, 221**
- Godin, Louis (1704-1760), 194, 206, 295
- Goodricke, John (1764-1786), 290
- Goujon, Jean-Jacques-Émile (1823-1856), 69, 70, 215, 287, 311, 382, 455
- Gounelle, 141
- Gramme, Zénobe (1826-1901), 185, 186, 187, 188, 189
- Gravimétrie, 36, 195-196, 206, 210, 213**
- Grégoire, abbé (1750-1831), 9, 349
- Grimaldi, Francesco Maria (1618-1663), 76, 77, 80
- Guinand, Pierre-Louis (1748-1824), 239
- Guizot, François (1787-1874), 59, 60, 260
- H**
- Hachette, Jean Nicolas (1769-1834), 5, 31, 35, 46
- Hadley, George (1685-1768), 323
- Haldat, Charles de (1770-1852), 172
- Hall, captain Basil (1788-1844), 324, 482
- Hall, Chester Moor (1703-1771), 227
- Hallé, Noël (1754-1827), 44
- Hallette, A. (1788-1846), 404, 414

Halley, Edmond (1656-1742), 234, 266, 292, 293, 294, 477

Halo, 478

Hamilton (1805-1865), 118

Hamy, 62

Harrison, John (1693-1776), 198

Hausmann, Georges (1809-1891), 447

Haxo, général François-Nicolas-Benoît (1774-1838), 432

Heilmann, Jean-Jacques (1822-1859), 423

Hélice, 417-418

Héliomètre, 277-278

Héliostat, 137-139, 144, 423

Helmholtz, Hermann von (1821-1894), 87, 455

Henderson, Thomas (1798-1844), 314

Henry (colonel), 217

Henry, Joseph (1797-1878), 173, 184, 185, 322

Henry, Paul Pierre (1848-1905), 243, 426

Henry, Prosper Mathieu (1849-1903), 243, 426

Herschel, Caroline (1750-1848), 270

Herschel, John (1792-1871), 118, 172, 173, 215, 255, 259, 268, 273, 275, 276, 286, 292, 297, 301, 302, 304, 422

Herschel, William (1738-1822), 10, 27, 28, 92, 118, 119, 132, 173, 227, 231, 243, 247, 256, 258, 259, 260, 267, 268, 269, 270, 273, 276, 277, 284, 285, 286, 290, 301, 302, 313, 390, 391, 476

Hevelius Johann (1611-1687), 312

Hiltner, William Albert, 290

Hipparque (milieu du II^e S. av. J.-C.), 348

Homs, Marcel, 446

Hooke, Robert (1635-1703), 80, 82, 418, 471

Hornblower, 395

Hubble, Edwin (1889-1953), 244

Huggins, William (1824-1910), 426

Hugo, Victor (1802-1885), 59, 67, 71, 73, 250, 251, 252

Humboldt, Alexandre de (1769-1859), 4, 8, 26, 34, 41, 42, 43, 45, 49, 50, 52, 59, 67, 69, 70, 72, 121, 133, 170, 172, 195, 213, 248, 250, 251, 274, 293, 308, 316, 320, 322, 323, 324, 337, 342, 343, 350, 352, 353, 355, 360, 373, 382, 383, 421, 475, 479, 480

Huygens, Christiaan (1629-1695), 76, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 91, 94, 101, 106, 112, 147, 148, 197, 225, 297, 308, 313

I

Ingénieur géographe, 217, 218-219

Ingénieur hydrographe, 349-350

Interstellaire (matière), 291

J

Jacobi, Moritz-Hermann von (1801-1874), 183

Jamin, Jules-Célestin (1818-1886), 70, 118, 122, 382, 451, 453

Janssen, Jules (1824-1907), 314, 425, 426, 456

Jean, 243

Joannis, 441

Joliot-Curie, Frédéric (1900-1958), 455

Joliot-Curie, Irène (1897-1956), 455

Joséphine (1763-1814), 63

Jouffroy d'Abbans, Achille de (c. 1799-?), 417

Jouffroy d'Abbans, Claude François de (1751-1832) 416, 417

Journal de l'École polytechnique, 14, 25

Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts, 25, 27, 318

Journal des Débats, 6, 20

Journal des Sçavans, 23

Journal La Réforme, 61

Journal Le Globe, 20, 442

Journal Le National, 59, 61

Jupiter, 225, 265, 280

satellites de, 147-148, 198, 200, 225, 254, 272, 424

K

Kant, Emmanuel (1724-1804), 270

Kater, captain Henry (1777-1837), 213, 214, 215, 366

Kelvin, William Thomson, Lord (1824-1919), 399

Kepler, Johannes (1571-1630), 77

Kirchhoff, Gustav (1824-1887), 285

Koehlin, Nicolas (1781-1852), 404, 405, 411, 433, 434

Kolmogorov, Andrei (1903-1987), 310

Kupfer, Adolf (1799-1865), 343

- L**
- La Caille, Nicolas Louis de (1713-1762), 9, 195, 200, 245, 371
- La Condamine, Charles Marie de (1701-1774), 194, 206, 295
- La Hire, Philippe de (1640-1718), 79, 194, 197, 216
- Lacuée, général Jean-Gérard (1752-1841), 36, 37
- Laffitte, Jacques (1767-1844), 55, 411
- Lafond, 400
- Lagrange, Louis de (1736-1813), 35, 44, 245, 267, 344, 454
- Lakanal, Joseph (1762-1845), 14
- Lalande, Jérôme de (1732-1807), 24, 36, 38, 194, 231, 232, 245, 271, 383, 389
- Lamarck, Jean-Baptiste de (1744-1829), 19, 454
- Lamartine, Alphonse de (1790-1869), 33, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 249, 408, 410, 432
- Lambert, Johann-Heinrich (1728-1777), 295, 296, 297, 313, 463, 466, 467
- Lambton, William (1756-1823), 211
- Lamé, Gabriel (1795-1870), 406, 407
- Lamy, Jérôme, 485
- Langevin, Paul (1872-1946), 455
- Langley, Samuel P. (1834-1906), 327
- Langlois, C. (actif de 1730 à 1750), 206, 230
- Laplace, Pierre-Simon (1749-1827), 7, 8, 17, 20, 35, 36, 38, 44, 45, 46, 51, 52, 59, 111, 115, 128, 130, 131, 132, 140, 160, 164, 178, 196, 206, 209, 210, 213, 216, 217, 218, 219, 233, 238, 245, 247, 254, 267, 269, 270, 320, 325, 326, 344, 348, 360, 362, 372, 373, 380, 398, 420, 453, 454, 455
- Largeteau (lieutenant), 215
- Larochefoucault-Liancourt, François, duc de (1747-1827), 430
- Larousse, Pierre (1817-1875), 432
- Lassell William (1799-1880), 260
- Laugier, Ernest (1812-1872), 32, 68, 70, 100, 175, 249, 250, 254, 256, 259, 261, 273, 276, 281, 295, 298, 302, 303, 320, 332, 362, 455
- Laugier, Lucie (1823-1900), 2, 32, 69, 71, 249, 250, 261, 382, 383, 425, 448
- Lavoisier, Antoine-Laurent de (1743-1794), 7, 12, 16, 17, 20, 59, 360, 397, 454, 485
- Le Gray, 423
- Le Monnier, Charles (1715-1799), 20, 194, 233, 330
- Le Mouël, Jean-Louis, vii, 338
- Le Noir, Étienne (1744-1832), 200, 201, 204, 207, 209, 230, 237, 365, 367
- Le Verrier, Urbain Jean-Joseph (1811-1877), 12, 46, 59, 60, 71, 73, 150, 151, 152, 153, 234, 242, 243, 245, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 271, 303, 312, 319, 320, 321, 322, 454, 455
- Lecomte, Casimir, 411
- Ledru-Rollin, Alexandre Auguste (1807-1874), 33, 60, 62, 63, 65
- Lefrançois de Lande, Michel (1766-1839), 38, 232, 271
- Legendre, Adrien-Marie (1752-1833), 35, 44, 200, 344, 454
- Leibnitz, Gottfried Wilhelm (1646-1716), 77
- Lemaître, Georges (1894-1966), 244
- Lennel, 230, 331
- Lenoir, Jean-Joseph Étienne (1822-1900), 186, 402
- Lepaute, Henri, 237, 368
- Lepaute, Jean-André (1709-1789), 198
- Lepaute, Nicole (1723-1788), 266
- Lerebours, Nicolas (1807-?), 239, 241, 243, 262, 423, 424
- Lerebours, Noël-Jean (1761-1840), 9, 233, 234, 235, 237, 239, 240, 241, 243, 252, 262
- Letarouilly, Paul-Marie (1795-1855), 429
- Levallois, 214
- Libri, Guglielmo (1803-1869), 58, 59
- Liebherr (1767-1840), 233
- Liouville, Joseph (1809-1882), 257
- Lissajous, Jules (1822-1880), 146
- Littleton, William, 418
- Lloyd (1800-1881), 118
- Lockyer, Norman (1836-1920), 456
- Locomotive, 379, 396, 404-405, 408, 411, 414**
- Lœwy, Maurice (1833-1896), 426
- Longitude, 147, 183, 197-198, 213, 215, 217, 218, 221-222, 271, 351, 385**
- Lorentz, Hendrik Antoon (1853-1928), 139, 455
- Louis XV (1710-1774), 20, 199, 230, 231
- Louis XVIII (1755-1824), 13, 325
- Louis-Philippe (1773-1850), 14, 33, 47, 53, 55, 60, 260

Lumière

- couleur, 84-85, 87, 97-99
 - diffraction, 78, 86, 88, 90, 91, 103-108, 111, 118, 121, 313
 - diffusion, 329-330
 - dispersion, 48, 78, 89
 - infrarouge, 92, 119-121, 132, 325-328
 - interférences, 49, 77, 89-92, 103-106, 110-111, 121, 136-137, 308-310, 361-363, 478
 - onde transversale, 112-115, 118
 - polarisation, 48, 93-103, 118, 282-294, 296-298, 328-330, 350, 452, 466-468, 478, 481
 - principe d'Huygens-Fresnel, 82, 105, 107
 - réfraction, 48, 49, 77, 78, 83-84, 89, 105, 117, 118, 126-128, 133, 308, 330, 358-363, 482
 - réflexion, 78, 83, 88, 89, 105, 106, 117, 481
 - théorie corpusculaire, ou de l'émission, 76, 77-79, 84, 97, 115-116, 126, 132-133, 140-144, 359-361
 - théorie ondulatoire, 49, 76, 78, 80-93, 102-119, 133, 140-144
 - ultraviolet, 92, 119-122, 132
 - vitesse, 47, 50, 70, 80, 91, 111, 123-154, 225, 243, 290-292, 424
 - zodiacale, 477
- Lune**, 215, 225, 233, 251-253, 254, 271, 282-284, 307, 420, 421, 424-426
- rousse, 325-327

Lunette

- astronomique (réfracteur), 127, 224-225, 227, 230, 233-237, 238-243, 251-252, 262, 272-273, 308
- de nivellement, 217
- de Rochon, 95, 98, 100, 231, 280, 296-297
- méridienne ou des passages, 218, 222, 226, 229, 230, 234, 248, 254, 262, 271

Liot, Bernard (1897-1952), 284

M

- Mach, Ernst (1838-1916), 455
- Machine à air chaud, 400-401
- Machine à vapeur, 18, 46, 169, 373-372, 384, 391-400, 402-405, 419

Machine binaire, 399-400

- Maclear, 314
- Maës, 263
- Magnétisme terrestre**, 230, 234, 272, 316, 330-343, 385, 470, 475-476, 477
- variation diurne, 337-339, 475
- Magneto, 174, 186-188
- Magnétosphère**, 341
- Mahler, Franz-Joseph (1795-1845), 239
- Mahy, François de (1830-1906), 449
- Mairan, Jean-Jacques Dortons de (1678-1771), 346
- Majocchi, Alessandro (?-1854), 424
- Malouin, Paul-Jacques (1701-1777), 485
- Malus, Étienne-Louis (1775-1812), 8, 45, 48, 59, 68, 96, 97, 282, 365, 387, 420
- Maraldi, Giacomo Filippo (1775-1812), 194, 371
- Maraldi, Giovanni Domenico (1709-1788), 290
- Marcet, Alexandre (1770-1845), 159
- Mars**, 225
- Marie, Alexandre-Thomas (1795-1870), 60, 65
- Mariotte, Edme (1620-1684), 120, 375, 478
- Marrast, Armand (1801-1852), 61
- Martin, Adolphe, 243
- Mascart, Éleuthère (1837-1908), 138
- Mathieu, Claude-Louis (1783-1875), 32, 33, 52, 65, 67, 70, 195, 213, 233, 248, 249, 250, 255, 261, 274, 275, 277, 293, 311, 366, 373, 383, 455
- Mathieu, Marguerite (1798-1859), 52, 248
- Maupertuis, Pierre-Louis Moreau de (1698-1759), 194
- Mauvais, Victor (1809-1854), 254, 259, 287, 288, 455
- Maxwell, James Clerk (1831-1879), 81, 117, 118, 119, 139, 168, 177, 455
- Mayer, Tobias (1723-1762), 202
- Mécanique céleste**, 256-257, 267, 292
- Méchain, Pierre-André (1744-1804), 10, 31, 35, 36, 44, 200, 203, 206, 207, 208, 209, 211, 216, 217, 219
- Médailon Arago**, 454
- Medheurst, 413
- Melloni, Macedonio (1798-1854), 121, 122, 300
- Mémoires de l'Académie des sciences*, 7, 26
- Mercié, Antonin (1845-1916), 382, 448
- Mercure**, 271
- passage de, 234

Mérimée, Léonor (1757-1836), 102, 103
 Mérimée, Prosper (1803-1870), 34, 59, 102
 Mersenne, Marin (1588-1648), 371
 Merz, Georg (1793-1867), 239
 Messier, Charles (1730-1817), 267, 276
Météorologie, 225, 230, 263, 272, 315-330, 316, 317-330, 472-475
Mètre, 203, 206-207, 210-213, 348
 Metternich, Clement-Wenceslas (1773-1859), 121
 Michel, 331
 Michelet, Jules (1798-1874), 59
 Michell, John (ca. 1724-1783), 125, 126, 127, 128, 129, 130, 268, 270, 285, 313
 Michelson, Albert (1852-1931), 124, 138, 139, 153, 154
Micromètre, 280-282
 Mirecourt, Eugène de (1812-1880), 444
Miroir tournant, 123, 141-144, 151-152
 Moigno, abbé François (1804-1884), 418
 Moitte, Jean-Guillaume (1746-1810), 245
 Molé, Louis-Mathieu, comte (1781-1855), 60
 Moll, 417, 418
 Monge, Gaspard (1746-1818), 5, 12, 13, 17, 19, 45, 48, 49, 97, 344, 387, 388, 391, 454, 485
 Mongès le Jeune, abbé, 25
Montlhéry (Essonne: tour de), 153
Monture équatoriale (ou parallatique), 227, 236-237, 240-243
 Morley, Edward William (1838-1923), 138, 139
 Morse, Samuel (1791-1872), 70, 181, 182, 183, 385
Moteur à explosion, 186, 401-402
Moteur électrique, 156, 169, 183-186, 189
 Mouchez, amiral Ernest (1821-1892), 424, 425, 448, 451
Mouvement propre, 275-276
 Mudge, major general William (1762-1821), 50, 213
 Mulot, Georges (1792-1872), 436, 437
Musée du Moyen-âge, 430
Muséum d'histoire naturelle, 429

N

Napoléon I^{er} (1769-1821), 13, 19, 28, 36, 38, 44, 48, 49, 52, 70, 71, 102, 108, 156, 233, 251, 270, 344, 387, 429

Napoléon III (1808-1873), 19, 33, 70, 71, 102, 442, 445
Navire à vapeur, 416-419
Nébuleuse, 27, 256, 266-268, 273, 276, 426
 Néel, Louis (1904-2000), 455
Neptune, 257-260
 Newcomb, Simon (1835-1909), 456
 Newcomen, Thomas (fin XVII^e S. -?), 393, 394
 Newton, Isaac (1642-1727), 76, 77, 78, 80, 84, 85, 87, 90, 91, 92, 93, 96, 101, 103, 104, 107, 124, 126, 128, 134, 138, 147, 194, 195, 196, 227, 245, 266, 267, 359, 478
 Nicol, William (1768-1851), 99, 296, 297, 298, 305, 306
 Nicollet, Jean-Nicolas (1786-1843), 15, 207, 255, 293
 Niepce de Saint-Victor, Claude Félix Abel (1805-1870), 423, 425, 426
 Niepce, Claude, 401
 Niepce, Nicéphore (1765-1833), 401, 419, 420, 421, 422, 423
Nivellement, 206, 215-217, 474, 482
 Nobili, Leopoldo (1784-1835), 172, 300
 Noël, Dom, 231, 273
 Nollet (1794-1853), 186
 Nörrenberg (1787-1862), 101
 Nouet, Nicolas-Antoine (1740-1811), 44
Notices biographiques, 53, 386-387, 403
Notices scientifiques, 389-391, 451

O

Oberhaeuser (1798-1868), 221
Observatoire de la Muette, 20, 231-232
Observatoire de l'École militaire, 9, 230, 233
Observatoire de Marseille, 10, 41
Observatoire de Paris, 9, 11, 12, 20, 36, 41, 50-52, 108-110, 193, 223-263, 380-381, 453
Observatoire de Toulouse, 10, 295
Océanographie, 349-355
 Ørsted, Christian (1777-1851), 27, 49, 51, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 169, 175, 178, 180, 397
Œuvres complètes d'Arago, 69-70, 383, 387, 461
 Ohm, Georg Simon (1789-1854), 178
 Olbers, Heinrich (1758-1840), 27, 258
 Oliva, Alexandre Joseph (1823-1880), 441, 446, 448, 450

Oort, Jan Hendrik (1900-1992), 294
Optique atmosphérique, 328, 477-479
Orage, 324-325, 470
 Orléans, duchesse d' (1814-1858), 60
 Outhier, Renaud (1694-1774), 194

P

Pajot d'Ons en Bray, Louis-Léon (1678-1754), 319
 Papin, Denis (1647-1714), 393, 412, 416
Parallaxe, 256, 272, 276-279
 Pardies, Ignace-Léon (1636-1673), 80, 82
 Parry, admiral Edward (1790-1855), 482
 Pascal, Blaise (1623-1662), 63, 216
 Pauton, Alexis Jean-Pierre (1732-1798), 418
 Pauwels, 404
 Pecqueur, Onésiphore (1792-1852), 412
 Peltier, Jean Charles (1785-1845), 178
Pendule de Borda, 196
 Pereire, Émile (1800-1875), 406
 Pereire, Isaac (1806-1880), 406, 445
 Perier, Casimir (1777-1832), 55
 Perot, Alfred (1863-1925), 273
Perpignan (Pyrénées-orientales), 30, 31, 35, 287, 382, 384, 448, 459
 Perrault, Claude (1613-1688), 224
 Perrin, Jean (1870-1942), 455
 Perrotin, Henri (1845-1904), 153
 Petit, Alexis (1791-1820), 26, 46, 52, 249, 360, 361, 362
 Petit, Frédéric (1810-1865), 70, 254, 295
Phare, 49, 102, 170, 186, 214, 363-371, 385
 Phillips, 426
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 24
Photographie, 1, 72, 298-299, 419-426, 451
Photomètre
 d'Arago, 296-298, 301-304, 463-465
 de Pickering, 303-306
 de Steinheil, 303-304
 de Zöllner, 303-305
Photométrie, 69-70, 295-307, 424, 463-468
Physique du globe, 225, 316
 instructions la concernant, 355, 469-483
 Piazzzi, Giuseppe (1746-1826), 27, 200
 Picard, Jean (1620-1682), 15, 147, 192, 193, 194, 197, 203, 216, 237, 245
 Pickering, Edward (1846-1919), 303, 305

Pictet, Marc-Auguste (1752-1825), 158, 159
 Pigott, Nathaniel (1725-1804), 290
Pile électrique, 156-157, 169
 Pixii, Antoine Hippolyte (1808-1835), 186
 Planck, Max (1858-1947), 346, 455
Pluviomètre, 319
 Poggendorf, Johann Christian (1796-1877), 175
 Poincaré, Henri (1854-1912), 139, 455, 456
 Poinsot, Louis (1777-1859), 105
 Poisson, Siméon-Denis (1781-1840), 35, 36, 44, 68, 111, 112, 116, 336, 345, 359, 387, 398
Polariscope-polarimètre, 48, 100-101, 282-284, 450
 Poncelet, Jean-Victor (1788-1867), 415
 Pons, Jean-Louis (1761-1831), 41, 292
 Pontécoulant, Gustave de (1795-1874), 58
 Porro, Ignazio (1801-1875), 221, 426
 Pouillet, Claude (1790-1868), 15, 178, 181, 327, 345, 346
 Prévost, 159
Pression de vapeur d'eau, 50, 373-377
Prisme de Nicol, 100, 296-297
Prisme de Rochon, 95, 97, 100, 280-281, 296-297
Prison, 429
Promontoire des songes, 251-253
 Prony, François Marie Riche de (1755-1839), 12, 108, 109, 373, 374
 Proudhon, Pierre (1809-1865), 410
 Puiseux, Victor (1820-1883), 426
 Puissant, Louis (1769-1843), 211, 218
Puits artésien, 435-439

Q

Quart de cercle, 193-194, 229, 230, 254
Quartz, 96, 98-99
 Quet, Antoine (1810-1884), 14
 Quinet, 426

R

Ramadié, Mgr., 447
 Rambuteau, Claude Philibert Barthelot de (1781-1869), 433
 Ramond, Louis François de Carbonnières (1755-1827), 319

- Ramsden, Jesse (1735-1800), 200, 201, 202, 213, 229, 230, 234
- Raspail, François-Vincent (1794-1878), 66, 249
- Rayet, Georges (1839-1906), 273, 456
- Rayleigh, John William Strutt, Lord (1842-1919), 328, 329
- Raynal, 35
- Réaumur, René Antoine de (1683-1757), 317
- Reboul, Henri Paul Irénée (1768-1839), 216
- Recherche scientifique**
aspects internationaux, 26-28
financement, 20-23
nature, 15-17
publications, 23-26
science et société, 18-20
- Recurt, Adrien (1798-1872), 60, 61
- Règle de Borda, 204-205, 219**
- Regnault, Victor (1810-1878), 256, 317
- Reichenbach, Georg von (1771-1826), 209, 218, 233, 237, 251, 254, 373
- Relativité, 124, 126-128, 139-140**
- Rennell, major James (1742-1830), 351, 480
- Repsold, Johann Adolf (1838-1919), 235, 238
- Révolution de 1830, 32-33, 57, 249, 387**
- Révolution de 1848, 33, 59, 60-67, 249, 260, 444**
abolition de l'esclavage, 62-64
assemblée constituante, 65
commission du pouvoir exécutif, 65-68
gouvernement provisoire, 61, 62
ministres, 62, 64-65, 400
- Revue des Deux-Mondes, 58*
- Riccioli, Giambattista (1598-1671), 192
- Richer, Jean (1630-1696), 15, 195, 237, 275
- Richtie, 180
- Rieussec, Nicolas-Mathieu (1781-1852?), 373
- Riquet, Pierre Paul de (1604-1680), 216
- Rittenhouse, David (1732-1796), 107
- Ritter, Johann Wilhelm (1776-1810), 92, 119, 132
- Rivaz (1752-1828), 402
- Robison, John (1739-1805), 130
- Rochon, Alexis Marie de (1741-1817), 95, 97, 98, 99, 100, 231, 280, 281, 293, 296, 297, 301, 306, 307
- Rodriguez, 38, 209
- Roig, Marie (1755-1845), 31
- Rømer, Ole (1644-1710), 79, 147, 148, 216, 225
- Ronchi, Vasco (1897-1988), 76
- Rooke, Laurence (1622-1662), 469, 470
- Rosse, William Parson, Lord (1800-1867), 273, 274, 275
- Rossel, Paul Édouard de (1765-1829), 368
- Rothschild, James de (1792-1868), 407
- Roue dentée, 141, 149-152, 154**
- Roy, général William (1710?-1790), 200
- Rozier, abbé Jean (1734-1793), 25
- Rumford, Benjamin Thompson (1753-1814), 366
- Rutherford, Lewis Morris (1816-1842), 426
- S**
- Sabine, captain Edward (1788-1883), 215, 218, 479
- Sainte-Beuve, Charles Augustin (1804-1869), 387, 444, 445
- Sainte-Claire Deville, Henri (1818-1881), 15, 446
- Salleron, 423
- Samuda, 413, 414
- Sarda, François (1929-2005), 30
- Saturne, 225, 269, 281, 424**
- Saussure, Horace Bénédict de (1740-1799), 327, 358
- Saussure, Nicolas Théodore de (1767-1845), 159
- Sauvage, Pierre Louis Frédéric (1785-1857), 418
- Savart, Félix (1791-1841), 101, 149, 163, 164
- Savary, Félix (1791-1841), 31, 46, 248, 249, 273
- Savery (2^e moitié du XVII^e S. -?), 393
- Schilling, 180
- Scintillation, 49, 307-312, 451**
- Scintillomètre, 311**
- Schneider, Adolphe (?-1845), 404
- Schneider, Eugène (1805-1875), 404
- Schœlcher, Victor (1804-1893), 62, 63, 64, 65, 387, 449
- Schröter, Johann Hieronymus (1745-1816), 284, 285
- Schwarzchild, Karl (1873-1916), 301
- Schweigger, Johann (1779-1857), 161, 175
- Secchi, Angelo (1818-1878), 300, 301, 327, 425
- Secrétan, Marc 1804-1867), 234

- Sédillot, 11
 Seebeck, Thomas Johann (1770-1831), 178
 Séguier, Baron Armand (1803-1876), 418
 Seguin, frères, 405
 Seguin, Marc (1786-1875), 395, 405
 Seidel (1821-1896), 303
 Serrin, Victor, 187
 Short, James (1710-1768), 232, 274
 Siemens, Werner von (1816-1892), 187, 189
 Silbermann, Johann Theobald (1806-1865), 137, 139
 Sisson, John (1690?-1760?), 230
 Smeathon, John (1724-1792), 393
 Smith, Francis Pettit (1808-1874), 418
 Snell, Willebord van Royen dit Snellius (c. 1580-1626), 192
Société d'Arcueil, 8, 17, 45
Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 7
Société de géographie, 7
Société philomathique, 7-8
 Soemmering, Samuel Thomas von (1755-1830), 179
Soleil, 48, 254, 256, 266, 271, 284-288, 290, 297-301, 424-425, 450, 454
 Soleil, Henri (?-1872), 101
 Soleil, Jean-Baptiste François (1798-1878), 103, 110, 281, 362, 367, 368, 369
Son (vitesse du), 50, 199, 371-373
 Soult, maréchal Nicolas (1769-1851), 406
Spath d'Islande, 79, 94-96, 113
Statues d'Arago, 441, 444, 445, 448-450, 454
 Stebbins, Joël (1878-1966), 291
 Steel, 396
 Stehelin, Édouard (1809-1904), 404
 Steinheil, Karl August (1801-1870), 181, 303
 Stendhal, Henri Beyle, dit (1783-1842), 59
 Stéphane, Édouard (1837-1923), 273
 Stephenson, Robert (1803-1859), 405
 Stirling, Robert (1790-1878), 401
 Stokes, George Gabriel (1819-1903), 136
 Stommel, Henry (1920-1992), 355
 Struve, Otto (1819-1905), 239, 241, 273
 Struve, Wilhelm (1793-1864), 148, 239, 255, 260, 273
- T**
- Talbot, Paulin (1799-1885), 406
 Talbot, William Henry Fox (1800-1877), 422
 Tatarski, Valerian, 310
- Télégraphe**
électrique, 141, 179-184, 215, 221-222, 263, 320-321, 322, 385
Chappe, 179-180, 182, 183
Télescope, 227, 230, 231-232, 243-244, 248, 268, 270, 273-274, 456, 465
Température de la Terre, 343-349, 437, 472-474, 480-481
 Terrien, 69
 Tesla, Nikola (1856-1943), 189
 Teulère, 364
 Thenard, Jacques (1777-1857), 8, 119, 157, 359
Théodolite, 200-202, 213-214, 218, 219, 221, 226, 233, 373
Thermodynamique, 397
Thermoélectricité, 178-179, 300
Thermomultiplicateur, 300
 Thiers, Adolphe (1797-1877), 54, 406, 431, 453
 Thomson William (Lord Kelvin, 1824-1907), 81
 Tisserand, Félix (1845-1896), 285, 348, 449, 451, 456
 Tobin, William, vii, 92, 141, 485
 Travers, 223, 240, 241
 Trémel, 231
 Trevitick, Richard (1771-1833), 393
Triangulation, 15, 36-41, 170, 191-222, 373
Trombe, 324, 481
Trou noir, 126
 Trussart, 432
Turbine, 433-434
 Tycho Brahe (1546-1601), 192, 198, 312, 313
 Tyndall, John (1820-1893), 327
- U**
- Uranus, 256-257, 259-260, 268, 270**
 Usherwood, 426
 Utzschneider, Joseph von (1763-1839), 233, 239
- V**
- Vagues, 481**
 Vaillant, maréchal Jean-Baptiste Philibert (1790-1872), 442
 Valazé, général Éléonor (1780-1838), 432
 Van der Heyden, 168

van Malderen, 186
 Vaneau, 14
 van-Zuylen-van-Nyevelt, 178
 Vauban, Sébastien le Preste de (1633-1707), 432
 Vaudoyer, Antoine Laurent Thomas (1756-1846), 232, 430
Vent, 323-324, 450, 474, 479
Vénus, 225
 passages de, 148, 254, 426
 Vicat Joseph (1821-1902), 427
 Vicat Louis-Joseph (1786-1861), 427, 428
 Vidal, Jacques (1747-1819), 216
 Volta, Alessandro (1745-1827), 27, 156, 158, 161, 387
 Voltaire, François Marie Arouet de (1694-1778), 267
 Vougy, de, 321
Voyages d'Arago, 50, 170, 195, 213

W

Wagner, 366
 Walferdin, François-Hippolyte (1795-1880), 437
 Watt, James (1736-1819), 46, 387, 388, 391, 392, 393, 394, 395, 403
 Weber, Wilhelm (1804-1891), 180, 336, 342, 343
 Wedgwood, 420
 Wells, William Charles (1757-1817), 325, 473

Wheatstone, Charles (1802-1875), 141, 144, 145, 180, 182, 187
 Whewell, William (1794-1866), 115, 176
 Whipple, 426
 Wichmann, 279
 Wilde, Henry (1833-1876), 186, 188, 189
 Williams, colonel Jonathan (1750-1815), 351, 479, 480
 Wilson, Alexander (1714-1786), 130, 133
 Wolf, Charles (1827-1918), 224, 273, 456
 Wolf, Rudolph (1816-1893), 338
 Wollaston, Francis (1731-1815), 119, 132, 156, 313, 314
 Woolf, Arthur (1766-1837), 393, 395, 397
 Wróblewski, 147

Y

Young, Thomas (1773-1829), 50, 76, 80, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 97, 101, 104, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 118, 119, 122, 130, 308, 359, 363, 388
 Yvon Villarceau, Antoine (1813-1883), 255, 273

Z

Zöllner, Johann Karl Friedrich (1834-1882), 303, 305

Liste des crédits

Les figures portant les numéros 1.0, 2.0a, 2.0b, 3.0, etc., sont respectivement en page de titre du chapitre 1, 2, 3, etc.

Académie des sciences de l'Institut de France : Figs. 1.3, 3.0, 3.29, 9.1.

Bibliothèque du Conservatoire national des arts et métiers : Fig. 5.3.

Bibliothèque de l'Observatoire de Paris :

Figure de couverture, Figs. 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.7, 1.9, 1.10, 1.11, 1.12, 1.13, 2.0a, 2.0b, 2.1, 2.2, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.10, 2.15, 2.16, 2.17, 3.1, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.9, 3.10, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.30, 4.0, 4.3, 4.4, 4.6, 4.8, 4.12, 4.13, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.20, 4.22, 4.23, 4.25, 4.26, 5.0, 5.1, 5.2, 5.5, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.12, 5.16, 5.17, 5.18, 5.20, 5.22, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 6.0, 6.2, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 7.0, 7.1, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25, 7.27, 7.28, 8.0, 8.2, 8.3, 8.4, 8.8, 8.9, 8.10, 8.11, 8.12, 8.13, 8.14, 8.15, 8.18, 8.21, 8.25, 8.27, 9.0, 9.2, 9.3, 9.4, 9.6, 9.7, 9.8, 9.10, 9.11, 9.13, 9.14, 9.17, 9.20, 10.0, 10.1, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.9, 10.10, 10.11, 10.12, 10.13, 10.14, 10.15, 10.17, 10.18, 11.2, 11.3, 11.20, 11.25, 11.26, 11.27, 11.28, 11.29, 12.0, 12.1, 12.2, 12.3, 12.5, 12.6, 12.7, 12.8, A2.1, A2.2.

Bibliothèque Nationale de France : Fig. 9.19.

Collection de l'École polytechnique : Figs. 1.8, 2.3, 2.12, 4.24, 10.16, 11.5, 12.4.

Collection ou dessins de l'auteur : Figs. 1.1, 1.5, 3.2, 3.3, 3.11, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.19, 3.20, 3.31, 3.32, 4.1, 4.2, 4.5, 4.7, 4.11, 4.19, 5.6, 5.11, 5.13, 5.23, 5.36, 6.1, 6.3, 6.9, 6.10, 7.2, 7.3, 8.5, 8.6, 8.7, 8.16, 8.19, 8.20, 8.24, 9.5, 10.2, 10.8, 11.0, 11.6, 11.7, 11.8, 11.9, 11.13, 11.14, 11.15, 11.16, 11.17, 11.18, 11.19, 11.23, 11.24, A2.3, A2.4, A2.5, A2.6.

Collections privées : Figs. 2.9, 2.11, 2.13, 2.14, 3.12, 4.9, 4.10, 4.14, 4.21, 5.4, 5.14, 5.15, 5.21, 5.28, 5.33, 5.34, 5.35, 7.26, 8.1, 8.22, 8.26, 9.9, 9.12, 9.15, 10.3, 11.4, 11.11, 11.12.

Domaine public : Figs. 3.8 (fr.wikipedia.org), 3.18 (fr.wikipedia.org), 5.19 (www.phase.c-strasbourg.fr), 8.17 (*Astrophysical Journal*, via cdsads.u-strasbg.fr), 8.23 (fr.wikipedia.org), 9.18 (fr.wikipedia.org), 9.19 (expositions.bnf.fr/lamer), 9.21 (earth.usc.edu), 11.10 (fr.wikipedia.org), 11.21 (en.structures.de), 11.22 (www.souillac.net).

Observatoire de Paris (autre que la bibliothèque) : Fig. 9.16.

Rectorat de l'Académie de Paris : Fig. 11.1 (cliché Gilles Vignier, Atelier Akiko).



Un nouveau regard sur la nature **Temps, espace et matière au siècle des Lumières**

Jacques Debyser

Au XVIII^e siècle, la science se dégage progressivement des présupposés et de la métaphysique : de la philosophie de cabinet, on passe à l'observation directe de la nature. Cet ouvrage présente et explique comment, au cours du XVIII^e siècle, le changement de mise en perspective de la science va permettre à cette dernière de mettre en œuvre son formidable développement. Un ouvrage original et aisément accessible à tous.

• 2007 • 978-2-86883-986-2 • 432 pages • 35 €

Histoire d'un pionnier de l'informatique **40 ans de recherche à l'Inria**

Alain Beltran et Pascal Griset

Ce livre raconte l'histoire de l'INRIA, Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, alors que l'Institut vient de fêter ses quarante ans. À la lecture de ce livre si contemporain, qui nous interpelle à la fois sur les modèles d'organisation humaine et sur la dynamique de la science, le lecteur découvrira également la place des grandes personnalités qui ont façonné l'Institut, lui conférant son ouverture et lui donnant des impulsions qui durent encore aujourd'hui.

• 2007 • 978-2-86883-806-3 • 304 pages • 29 €



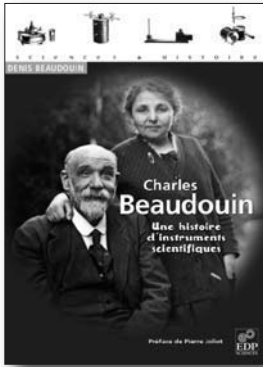
Des neutrons pour la science **Histoire de l'Institut Laue-Langevin, une coopération internationale particulièrement réussie**

Bernard Jacrot

Ce livre raconte quarante années de la vie et de l'histoire de l'Institut Laue-Langevin, organisme créé par la France et l'Allemagne pour effectuer des recherches dans le vaste champ des neutrons.

• 2006 • 978-2-86883-878-2 • 184 pages • 19 €





Charles Beaudouin

Une histoire d'instruments scientifiques

Denis Beaudouin

Cet ouvrage retrace l'histoire de Charles Beaudouin, constructeur d'instruments scientifiques au parcours singulier, riche en découvertes, développements et rebondissements aussi bien scientifiques et technologiques que financiers. À travers cette histoire, c'est tout le symbole d'une aventure scientifique et industrielle française du XX^e siècle qu'aborde ce livre.

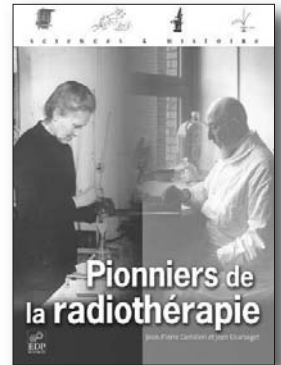
• 2005 • 978-2-86883-807-3 • 288 pages • 35 €

Pionniers de la radiothérapie

Jean-Pierre Camilleri et Jean Coursaget

L'ouvrage présente le travail et l'œuvre de Claudius Regaud qui, en collaboration avec Marie Curie, développa la recherche en radio-physiologie, avec ses applications thérapeutiques. Cet ouvrage a fait partie des œuvres nominées au Prix Roberval 2007, dans la catégorie Grand Public.

• 2005 • 978-2-86883-811-1 • 240 pages • 25 €

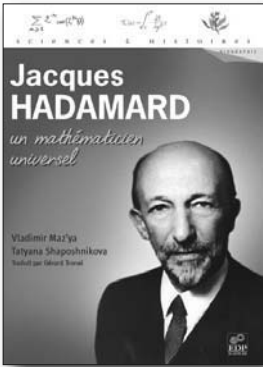


L'Univers dévoilé

James Lequeux

Bien qu'il n'existe pas encore de réponse à certaines questions fondamentales, les progrès récents de l'astronomie ont été si spectaculaires que l'essentiel de l'Univers nous est aujourd'hui dévoilé. Ce sont l'histoire et les moyens de ces progrès que décrit ce livre sous une forme simple et vivante, mais sans sacrifier la rigueur scientifique.

• 2005 • 978-2-86883-792-1 • 312 pages • 29 €



Jacques Hadamard

Un mathématicien universel

Vladimir Maz'ya et Tatiana Shaposhnikova
(traduit par Gérard Tronel)

Jacques Hadamard (1865-1963) est un des mathématiciens les plus importants du XX^e siècle. Personnage hors du commun, cet éminent scientifique a exercé une grande influence sur le développement des mathématiques et sur la vie intellectuelle, politique et sociale française. Il s'agit de la première biographie jamais publiée sur cet homme.

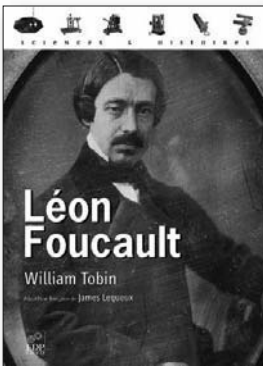
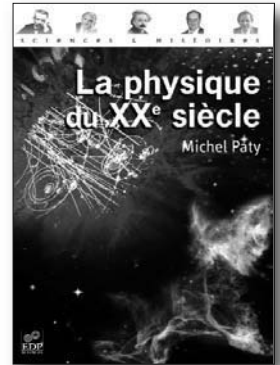
• 2005 • 978-2-86883-707-7 • 554 pages • 34 €

La physique du XX^e siècle

Michel Pâty

Cet ouvrage retrace les progrès accomplis dans nos connaissances en sciences physiques au cours d'un XX^e siècle riche en événements, en mettant en évidence les rapports interdisciplinaires, les racines historiques, les nouveautés conceptuelles et les interrogations philosophiques. Un bilan qui amène aussi à s'interroger sur ce que sera la physique du XXI^e siècle.

• 2003 • 978-2-86883-518-X • 328 pages • 34 €



Léon Foucault

William Tobin (traduit par James Lequeux)

Concepteur du télescope moderne, pionnier de la photographie, inventeur du gyroscope, Léon Foucault, grâce à son pendule, a vu la Terre tourner. Cet ouvrage décrit le parcours exceptionnel de ce physicien touche-à-tout, dans un monde du XIX^e siècle en plein développement industriel et remarquablement ouvert aux sciences.

• 2002 • 978-2-86883-615-1 • 368 pages • 29 €

