



HAL
open science

L'histoire de la photométrie en France au XIXe siècle : la mesure de la lumière entre métrologie physique et métrologie sensorielle

Patrick Grelet

► To cite this version:

Patrick Grelet. L'histoire de la photométrie en France au XIXe siècle : la mesure de la lumière entre métrologie physique et métrologie sensorielle. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Le Mans Université, 2024. Français. NNT : 2024LEMA3004 . tel-04914123

HAL Id: tel-04914123

<https://theses.hal.science/tel-04914123v1>

Submitted on 27 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE / SOCIETES

BRETAGNE / TEMPS

LOIRE / TERRITOIRES



THESE DE DOCTORAT

HISTOIRE

UNIVERSITE
DE LE MANS

COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 604

Sociétés, Temps, Territoires

Spécialité : Épistémologie et histoire des sciences et des techniques

Par

Patrick GRELET

L'histoire de la photométrie en France au XIX^e siècle

La mesure de la lumière entre métrologie physique et métrologie sensorielle

Thèse présentée et soutenue à Le Mans, le 4 novembre 2024

Unité de recherche : Laboratoire TEMOS UMR 9016

Thèse N° : 2024LEMA3004

Rapporteurs avant soutenance :

Virginie Fonteneau

Professeure des universités, Université Paris-Saclay

Olivier Morizot

Maître de Conférences, Centre Gilles Gaston Granger d'Aix-Marseille Université

Composition du Jury :

Président : Virginie Fonteneau

Professeure des universités, Université Paris-Saclay

Examineurs : Alain Bulou

Professeur des universités émérite, Le Mans Université

Olivier Darrigol

Directeur de recherches émérite, CNRS, UMR SPHere

Olivier Morizot

Maître de Conférences, Centre Gilles Gaston Granger d'Aix-Marseille Université

Dir. de thèse : Nathalie Richard

Professeure des universités, Le Mans Université

L'histoire de la photométrie en France au XIX^e siècle
La mesure de la lumière, entre métrologie physique et
métrologie sensorielle

Patrick Grelet

18 décembre 2024

À Françoise, Camille et Victor

pour leur patience infinie et leur courage extraordinaire.

À la mémoire de François Sauterey

À la mémoire d'Hubert Gié

Remerciements

Depuis mon entrée à l'Université, avec un grand « U », c'est à dire au sens noble, *impérial* du mot, j'ai croisé deux sortes de collègues : ceux d'abord qui vous encouragent dans votre quête de savoir et ceux qui s'emploient à vous en détourner, ces derniers animés d'une seule et funeste passion : la jalousie ! Mes remerciements vont donc aux premiers et à ceux qui m'ont appris mon métier.

C'est pourquoi je tiens à remercier ici les personnes qui m'ont accompagné sur le chemin de la recherche, pendant de si longues années. Je commence par madame Nathalie Richard qui a cru en mon projet et m'a accueilli avec toute la bienveillance possible au sein du laboratoire TEMOS (qui s'appelait encore à l'époque CERHIO).

Je la remercie d'autant plus que mon projet avait été refusé par un autre laboratoire universitaire dont je ne remercie pas les responsables, cette fois ! Je dois préciser que cette université, proche de chez moi, voulait bien accepter ma candidature pour suivre la formation diplômante qu'est le doctorat, à la condition d'acquiescer des droits d'inscription exorbitants, d'un montant égal à au moins dix fois le montant légal. Au prétexte qu'une inscription relève d'une « reprise d'études », certaines universités se livrent à cette pratique abusive. Bien entendu, cette « taxation » ne s'accompagne d'aucun service supplémentaire et le *stagiaire* en formation continue aura seulement droit à sa chaise dans une salle de TD, comme les autres étudiants de la formation initiale. J'ai refusé de me soumettre à ces abus qui doivent être dénoncés !

Cette parenthèse refermée, Je remercie donc madame Nathalie Richard pour toute la patience qu'elle a manifestée à mon égard. Grâce à ses conseils, je comprends mieux le rude travail du chercheur en histoire.

Je remercie également messieurs Alain Bulou et Olivier Darrigol qui m'ont fait l'amitié et l'honneur d'assurer le suivi de mes travaux. Je les remercie pour leurs avis éclairés et leurs encouragements. Je ne puis que regretter de n'avoir pu, pour des raisons de force majeure, trouver les opportunités qui m'auraient permis de prolonger des échanges qui, bien que trop rares, m'ont apporté beaucoup.

Je remercie monsieur Thomas Lequeux, astronome de l'Observatoire de Paris, pour m'avoir aimablement autorisé à utiliser quelques fragments du très bel ouvrage qu'il a consacré à la vie et à l'œuvre de François Arago.

Je remercie monsieur Nicolas Claire de l'université d'Aix-Marseille qui a pris de son temps pour me faire visiter l'Espace muséal Charles Fabry et m'avoir permis d'accéder à des archives inédites, concernant le physicien Jules Macé de Lépinay, conservées par l'université qui a vu œuvrer ce scientifique éminent et l'un des personnages importants de cette thèse.

Je remercie monsieur Michel Roux, président de AFEGAZ (Association la Flamme Européenne du GAZ) pour les documents exceptionnels qu'il m'a communiqués, en particulier les photographies d'un banc photométrique complet, datant du Second Empire. Je ne peux que saluer le travail exemplaire de ces bénévoles qui assurent la conservation de notre patrimoine technologique et de ces matériaux *physiques* qui sont d'une grande valeur pour l'historien.

Je remercie enfin les personnes qui œuvrent au sein de la BU du Mans. Leur compétence m'a permis d'accéder à des documents que je n'aurais jamais pu trouver sans leur secours.

Sommaire

<i>Mesurer la lumière</i>	p.9
Chapitre 1 <i>Un nouvel Art</i>	p.21
Chapitre 2 <i>Des sciences en maturation</i>	p.59
Chapitre 3 <i>Nouvelles lumières (1800-1850)</i> L'éclairage au gaz et l'arc voltaïque	p.129
Chapitre 4 <i>Photométrie des sources diversement colorées</i> Un problème récalcitrant et nouvelles recherches : les effets physiologiques sur la photométrie hétérochrome (1880-1900)	p.207
Chapitre 5 <i>Étalons de lumière et grandeurs photométriques</i>	p.269

Conclusion	p.341
Annexes	p.349
Bibliographie	p.404
Tables	p.440

Abréviations utilisées

ACP : Annales de chimie et de physique (Paris) ;

CRAS : Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences (Paris) ;

EHESS : École des hautes études en sciences sociales ;

HARS : Histoire de l'Académie royale des sciences (Paris) ;

MARS : Mémoires de l'Académie royale des sciences (Paris) ;

Phil. trans. : Philosophical transactions of the Royal Society (Londres) ;

Phil. Mag. : Philosophical magazine (Londres) ;

RHS : Revue d'histoire des sciences (Paris) ;

OC : Œuvres complètes d'Augustin Fresnel ;

Œuvres : Œuvres complètes de François Arago ;

Cnam : Conservatoire national des arts et métiers ;

Cnum : Conservatoire numérique des arts et métiers.

Mesurer la lumière

Étymologiquement, la *photométrie*, du grec $\varphi\omega\varsigma$, $\varphi\omega\tau\omicron\varsigma$ ou *photos* : *lumière* et de $\mu\epsilon\tau\rho\nu$ *métron* : *mesure* est la mesure de la lumière. Mais une définition aussi élémentaire n'en pose pas moins de multiples questions. Et d'abord, que mesure-t-on et pour quels usages ? Plus précisément quelle est cette *lumière* que l'on prétend mesurer ? Alors que le siècle des Lumières s'achève, qui pour mieux en parler que les encyclopédistes. L'article *Lumière* de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert commence par cette définition laconique :

LUMIERE (Optiq.) est la sensation que la vûe des corps lumineux apporte ou fait éprouver à l'âme, ou bien la propriété des corps qui les rend propres à exciter en nous cette sensation. *Voyez* SENSATION.¹

Pour les encyclopédistes, la lumière est donc une sensation. Mais l'article copieux de l'*Encyclopédie* ne s'arrête pas sur ce seul aspect sensoriel, il continue aussitôt par les définitions de l'agent lumineux qui provoque la sensation, définitions qu'en donnent les physiciens — ceux que l'usage du temps appelle « mathématiciens » ou « géomètres » — les plus illustres : Christiaan Huygens (1629-1695) parle d'une ondulation, formellement identique à une vibration sonore, dans un *éther* élastique, milieu infiniment ténu, puisque censé remplir tout l'espace ; pour Isaac Newton c'est un flux de particules, de masses très petites, émises à une vitesse considérable par la source lumineuse, particules dont les différentes grosseurs déterminent la réfrangibilité des rayons et les couleurs observées à la sortie du prisme. Ne pouvant évaluer ces masses, certains physiciens du premier quart du XIX^e siècle rangeront la lumière parmi les « fluides impondérables ».

Mais comment mesurer un fluide impondérable qu'on ne peut donc *peser* et a fortiori mesurer ? Comment évaluer une sensation qui mobilise des

1. *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, par une société de gens de lettres*, tome neuvième, Neufchâstel, Samuel Faulche, p. 717-724.

phénomènes non seulement d'ordre physiologique mais aussi de l'ordre de la psyché, du mental, en un mot de la psychologie. Tout cela ne satisfait guère les savants qui veulent gouverner la science par la raison non par les sens, au seuil d'un siècle qui verra le triomphe de la technique et de la lumière disponible... à tous les étages. Car c'est aussi un temps nouveau où viendront s'ajouter aux sources naturelles et artisanales de lumière les moyens puissants d'éclairage qui transformeront définitivement les modes de vie. Il devient indispensable en ce XIX^e siècle qui veut tout mettre en nombres, dans un vaste mouvement de « modernité et globalisation »², d'inventer les instruments pour mesurer la lumière industrielle. Bientôt la lumière sortira des usines (à gaz) comme une simple marchandise soumise au contrôle de qualité et dont tout en elle sera mesuré : la pression, le titre, le pouvoir éclairant. Elle deviendra un produit de consommation et une heure de clarté en plus, après le crépuscule, s'évaluera en espèces sonnantes et trébuchantes. La lumière aura un prix !

Écrire l'histoire de la photométrie au XIX^e siècle c'est se placer au croisement de plusieurs histoires : une histoire de la vision, mêlant elle-même plusieurs sujets, psychologie, physiologie, psychophysique ; une histoire des optiques géométrique, physique et physiologique ; une histoire industrielle de la lumière artificielle, de son déploiement dans les espaces urbains et maritimes ; une histoire de la métrologie, de la photographie, de la carbochimie et de l'électricité. Cette histoire se mêle aussi à l'histoire sociale et politique d'un siècle où sont décidés les grands travaux menant au quadrillage des villes par les réseaux de la modernité. Si la photométrie est présente dans toutes ces histoires, on ne lui a concédé qu'un rôle marginal dans chacune d'elles. La nouvelle approche proposée ici veut lui donner la place centrale et retracer l'édification, au fil du siècle, de ce savoir qui associe les métrologies physique, sensorielle et industrielle.

La période envisagée dans ce travail s'étend sur la totalité du XIX^e siècle. L'histoire de la photométrie ne procède pas par révolution copernicienne, maxwellienne ou relativiste et les balises chronologiques n'y apparaissent pas avec netteté. L'histoire de la photométrie a certes commencé avant l'année 1800 et s'est prolongée après l'année 1900. Si ces bornes temporelles paraissent de prime abord artificielles, elle correspond pour la première à une époque de grands bouleversements en France d'où émerge une jeunesse scientifique très inventive, découvreuse en 1809 (Louis-Étienne Malus) de la polarisation de la lumière par réflexion vitreuse et à la naissance de la photométrie en lumière polarisée. Quant à l'année 1900, elle marque la création de la

2. Dominique Pestre, *Histoire des sciences et des savoirs 2. Modernité et globalisation*, Paris, Seuil, 2015.

Commission internationale de la photométrie, la CIP, qui deviendra, après sa restructuration à son congrès de Berlin en 1913, la Commission internationale de l'éclairage, la CIE, organisation regroupant les experts des domaines de la vision et de l'éclairage.

Peu d'auteurs se sont penchés sur l'histoire de la photométrie en France. Même s'il en existe des fragments dans certains ouvrages³, les récits de ces historiens se limitent pour la plupart à la première photométrie des XVII^e et XVIII^e siècles et aux fondateurs de la discipline que sont Pierre Bouguer (1698-1758) et Jean-Henri Lambert (1728-1777). La photométrie du XIX^e siècle est racontée, mais de façon partielle, dans les biographies que certains auteurs ont consacrées aux savants du siècle⁴. Mêmement, la photométrie ne semble pas être un sujet de choix dans la littérature anglo-saxonne. Il faut néanmoins mentionner le travail de Sean François Johnston⁵ et la copieuse histoire que David L. DiLaura a consacré à ce sujet, en introduction à sa traduction de la *Photometria* de Lambert⁶. Malheureusement, ces auteurs ne citent pas les contributions françaises à la photométrie et mettent en avant les auteurs anglophones et germanophones. Si Johnston s'étend longuement sur l'histoire des laboratoires institutionnels de métrologie en Grande-Bretagne, en Allemagne et aux États-Unis, il affirme l'absence en France de telles institutions, en oubliant le Laboratoire central d'électricité (LCE) fondé à Paris le 9 février 1888⁷ et le Laboratoire d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines, fondé le 9 juillet 1901⁸. Le National Physical Laboratory (NPL) britannique fut fondé en 1900, la Physikalisch Technische Reichsanstalt (PTR) allemande fut fondée en 1887, à l'initiative d'Helmholtz et de Siemens et le Bureau of Standards (USBS) états-unien en 1901. Alors que la Commission internationale de la photométrie a été fondée en France, à l'ultime fin du XIX^e siècle, à l'occasion du Congrès international de l'Industrie du gaz, sous la présidence de Théodore Vautier (1852-1930), la non prise

3. O. Darrigol, *A History of Optics From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*, Oxford, Oxford University Press, 2012, p. 110-116.

4. Voir notamment James Lequeux, *François Arago Un savant généreux, physique et astronomie au XIX^e siècle*, Paris, EDP Sciences Observatoire de Paris, 2008 et William Tobin, *Léon Foucault. Le miroir et le pendule*, Paris, EDP Sciences, 2002.

5. Sean François Johnston, *A Notion or a Measure : The Quantification of Light to 1939*, University of Leeds, 1994.

6. Johann Heinrich Lambert, *Photometry or on the measure and gradations of light, colors and shade*, Translation from the Latin by David L. DiLaura, The Illuminating Engineering Society of North America, 2001, ix.

7. Lire à ce sujet Girolamo Ramunni, Michel Savio, *1894-1994 Cent ans d'histoire de l'École Supérieure d'Électricité*, 1995, p. 31-34.

8. Sur l'installation du Laboratoire d'essais au Cnam voir « Le Laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers », *Le génie civil*, t. 43, N°11, 1903, p. 161-166.

en compte des travaux effectués sur la photométrie, en France, durant ce siècle, invite à questionner les lacunes de l'historiographie. C'est d'ailleurs ce questionnement qui a motivé notre recherche sur l'avancement en France de cette science que Johnston qualifie de « peripheral science », en précisant « because photometry remained a 'science on the side-lines' for the entire period covered here (and arguably remains so today) »⁹.

« Science à la marge », est-ce vraiment si sûr ? Quelle est la place dans les sciences de la photométrie, à la fin du XVIII^e siècle, au commencement de la période intéressant notre étude. Parmi les sciences qui se préoccupent de la lumière, l'optique, dit l'Encyclopédie, « renferme la Catoptrique & la Dioptrique, & même la Perspective ». Mais, dès 1760, année de publication de sa *Photometria*, Jean-Henri Lambert annonce avec aplomb : « Nous considérons la Photométrie comme la seconde partie de l'Optique. La première étant celle qui traite de la route de la lumière, de son mouvement, de ses modifications, de ses effets et de ses usages. »¹⁰ La première branche de l'Optique, selon Lambert, représente la « route de la lumière » dans un milieu « diaphane » par le modèle sensible de rayon lumineux qui, selon le principe de *la propagation rectiligne de la lumière*, est une droite tant que cette propagation se fait dans un milieu homogène et isotrope. Quand le rayon rencontre un miroir ou un dioptré, il se brise selon les lois bien connues de la réflexion et de la réfraction. L'ensemble de ces trois principes, auquel doit s'ajouter le *principe du retour inverse de la lumière*, permet de ramener les questions d'optique à des problèmes de géométrie, sans avoir à se préoccuper de la nature de l'agent lumineux. Mais l'épure des rayons de lumière, tracée selon les règles de l'optique géométrique ne suffit plus quand, traversant un cristal de spath d'Islande, la lumière se réfracte non seulement selon la loi ordinaire mais en fournissant un second faisceau appelé pour l'occasion « extraordinaire ». Elle ne suffit pas davantage pour expliquer la diffraction, les interférences et quand la lumière dévoile ses couleurs à la traversée d'une lame mince (irisations sur une bulle de savon) ou d'un coin d'air (les fameux anneaux de Newton). Pour la première partie de l'optique, le XVIII^e siècle s'achève sur toutes ces questions non résolues.

Si les théories sur la lumière manquent encore de sûreté pour y répondre, le savoir des géomètres côtoie celui d'opticiens passés maîtres dans la fabrication d'instruments de haute facture, pour les observations tant astrono-

9. Johnston, [Joh01], p. 317.

10. J.H. Lambert, *Photometria, sive, De mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae* ou *Photométrie ou de la mesure et de la gradation de la lumière, des couleurs et de l'ombre*, traduction française du latin de J. Boye, J. Couty et M. Saillard, L'Harmattan, Paris 1997, 14.

miques que microscopiques. Mais ils se heurtent à un problème que Newton avait prétendu insoluble : la construction d'objectifs achromatiques offrant des observations débarrassées des aberrations causées par la dispersion de la lumière. Entreprise sur laquelle l'« erreur » de Newton en a découragé plus d'un. Le succès attendra donc le siècle prochain.

Pour ce qui concerne maintenant le reste de l'optique, Lambert précise :

En revanche pour la seconde partie, que nous avons intitulé Photométrie, où l'on traite de l'éclat de la lumière, de sa force éclairante, des diverses modifications des couleurs et de l'ombre, il nous faut partir de l'œuf. En effet, même si l'on trouve çà et là dans les traités d'Optique certaines indications sur ces sujets, il n'en convient pas moins de les reprendre en quelque sorte à partir des premières notions pour qu'on puisse voir de quelle façon tout cela forme un tout.¹¹

La position de Lambert envisage une vaste photométrie, nouveau champ disciplinaire à développer au côté de tout le savoir déjà rassemblé par l'optique. Pas vraiment, une science à la marge ! Les problèmes ne manquent pas : par exemple, il ne suffit pas de connaître les angles de réflexion et de réfraction des rayons lumineux, il faut aussi — et c'est le rôle de la photométrie — savoir calculer et mesurer les quantités de lumière réfléchies et réfractées. Certes, « La Photometrie n'est pas un país entierement inculte. », tempère Lambert et de citer les travaux de Pierre Bouguer et de Leonhard Euler (1707-1783). Mais il faut, affirme-t-il, remonter aux origines et reconstruire cette science « ab ovo », rassembler les grandeurs fondamentales, les débarrasser de leurs définitions anciennes et confuses, les doter de définitions nouvelles et précises, appliquer à la photométrie les règles et théorèmes incontestables du géomètre. Cela semble à la portée des esprits du temps.

Pourtant, plus d'un siècle après la publication de Lambert, dans les colonnes de la revue hebdomadaire, *La Lumière Électrique*, André Blondel (1863-1938) écrit :

La photométrie a conservé sans grand changement la phraséologie qu'elle a reçue du XVIII^e siècle ; cela s'explique sans doute par son peu de développement théorique et par les horizons forcément limités qu'elle offre aux chercheurs ; mais ce n'est pas un motif suffisant pour perpétuer certains anachronismes tels que la

11. J. H. Lambert, *ibid.* p. 14.

définition de la quantité de lumière et le choix des unités.¹²

La réflexion de Blondel interroge directement le sujet de notre étude : l'histoire de la photométrie sur une période qui s'achève par la constatation de ses maigres progrès. Constat partagé par d'autres avant Blondel : en 1833, un siècle après la publication par Bouguer de son *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, Dominique François Arago (1786-1853) évoque, devant ses confrères académiciens, une science « restée à peu près stationnaire » à côté « des progrès brillants et inespérés » d'une optique devenue physique (infra, 100). Pendant un siècle extraordinairement fécond dans tous les domaines de la physique et de la chimie, la photométrie ferait figure d'exception, du moins selon les observateurs frappés par la lenteur désespérante de son développement. La photométrie serait-elle une science sortie de l'histoire ?

La réalité de cette stagnation, ses causes n'ont pas fait l'objet d'études systématiques. Le travail présent, s'il ne prétend pas combler totalement cette lacune, a pour seule ambition de mettre en lumière les travaux des *photomètres* du XIX^e siècle et les défis auxquels ils ont été confrontés. Il faudra tenter de résoudre le paradoxe d'une discipline qui n'aurait pas atteint l'ampleur prévue par Lambert, en dépit de son interaction constante avec les sciences fondamentales en plein essor, l'optique évidemment, mais aussi la thermodynamique, l'électricité, et même la chimie. Un examen rapide des méthodes de la photométrie montre des évolutions différentes entre une photométrie astronomique utilisant des instruments de haute facture et la photométrie terrestre et maritime. Science de l'ingénieur à la recherche de l'efficacité, cette dernière utilise, dans la première époque du siècle, des instruments de mesure rudimentaires. Il faut affiner ses modèles et ses méthodes : la métrologie et la normalisation s'annoncent. Une autre voie se dessine, à la fin de cette époque, celle de la photométrie électrique, résolument placée au service de la recherche fondamentale. Mise au point par Antoine-Philibert Masson (1806-1860), elle est consacrée à l'étude des lumières brèves de l'étincelle électrique. La question des lumières brèves et des lumières colorées fait entrer dans la photométrie des paramètres physiologiques de la vision humaine. La détermination de la perception visuelle pour les différentes longueurs d'onde du domaine visible, la quantification de l'effet Purkyně, les mesures de la sensibilité différentielle constituent autant de sujets d'étude qui n'ont pas été pris en compte par les historiens. Ces éléments inédits ont mérité dans notre recherche un récit détaillé.

Le travail présenté ici est l'histoire méconnue d'une science physique qui

12. André Blondel, « Grandeurs et unités photométriques », *La Lumière Électrique*, tome 53, n°27, 1894, p. 7.

ne l'est pas moins. Ce fait ne doit pas surprendre puisque aucun enseignement ne lui est réservé dans les cursus universitaires scientifiques et que sa place est des plus réduites dans les traités d'Optique. Si les unités des principales grandeurs physiques — mètre, kilogramme, seconde, ampère — sont presque universellement connues, on serait peut-être bien en peine de trouver dans un panel représentatif de la population étudiante, une proportion significative à même de citer la septième unité fondamentale du Système international (SI), celle de l'intensité lumineuse, la *candela*, l'unité de lumière, ce qui n'est pas rien ! La photométrie est une science expérimentale, pratique, une science de l'ingénieur, ce qui n'arrange rien quand la mode est à l'enseignement formel de l'incontournable doctrine quantique. L'histoire proposée par cette recherche accorde une large place aux expériences et aux instruments de la photométrie. Elle a pu être reconstituée à partir d'un vaste ensemble de sources primaires imprimées et, pour la plupart, numérisées. Parmi ces sources figurent les ouvrages des auteurs impliqués et leurs publications dans les principales revues scientifiques (*Annales de chimie*, *Annales de chimie et de physique*, *Journal de physique théorique et appliquée*, *Bibliothèque britannique* (*Bibliothèque de Genève*), *Philosophical Transactions of the Royal Society*, *Philosophical Magazine*, *Annalen der Physik und Chemie*, *Il nuovo cimento*, *Journal of Optical Society of America*, *Nature...*) et dans les bulletins des sociétés savantes (*Mémoires de la Société d'Arcueil*, *Bulletin de la Société philomatique de Paris*, *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale*, *Bulletin de la Société internationale des électriciens*). Il faut ajouter les articles de la presse spécialisée (*La Lumière électrique*, *L'Éclairage électrique*, *L'Industrie électrique*, *Le génie civil*, *The Electrician*) et de vulgarisation (*Cosmos*, *Les merveilles de la science*, *La nature*), les comptes rendus des congrès internationaux des électriciens (Paris (1881-1900), Chicago (1893)), les rapports des meetings de l'Association britannique pour l'avancement des sciences, etc. Quelques sources manuscrites ou autographes ont complété cet ensemble, en particulier les comptes rendus des séances du Bureau des longitudes, les états de service de la main des principaux acteurs de la photométrie en France, documents recueillis sur la base *Léonore* des légionnaires, membres de l'ordre de la Légion d'honneur.

Ce travail est une thèse d'histoire des sciences, non pas des institutions scientifiques. Elle raconte la construction d'une discipline de la physique, en mettant l'accent sur l'intérêt heuristique de telle ou telle méthode employée. Pour autant, les facteurs externes ne peuvent pas être laissés de côté et leur intervention dans notre propos a bénéficié de plusieurs sources secondaires : en particulier, sur la réorganisation scientifique en France dans la période post-révolutionnaire et sur la formation de l'élite scientifique, nous avons consulté

les travaux de Jean-Luc Chappey¹³, Jean Dhombres et Nicole Dhombres¹⁴, Robert Fox, George Weisz¹⁵, etc. Pour ce qui concerne l'importance des ingénieurs polytechniciens dans l'élite « technocratique » du XIX^e siècle, nous nous sommes penchés sur les travaux de Bruno Belhoste¹⁶.

Cette thèse suit sensiblement un ordre chronologique et se divise en cinq chapitres. Chacune de ces parties aborde une problématique propre à une époque, mais elle peut aussi dépasser le cadre strict imposé par ce découpage. Chaque chapitre met ainsi en lumière les apports de telle ou telle personnalité à la résolution de ces différentes questions.

Le premier chapitre rend compte de l'héritage légué par les photomètres¹⁷ du XVIII^e siècle. Trois personnalités se distinguent dans ce siècle par leur apport à la structuration des savoirs propres à la mesure de la lumière : Pierre Bouguer, Jean-Henri Lambert et Benjamin Thompson, comte Rumford. Les techniques élaborées pour ce « nouvel art » se révéleront suffisamment stables pour durer pendant le siècle suivant.

Le second chapitre se consacre à la maturation de la photométrie à côté d'une optique qui découvre la lumière obscure (infra-rouge et ultra-violet) aux confins de la lumière visible. La lumière se révèle aussi polarisée après une réflexion sur une glace, un miroir, la surface de l'eau ou à la traversée de certains corps diaphanes. Toutes ces découvertes se font dans le contexte du bouleversement profond, consécutif à la Révolution, des institutions détentrices des savoirs. Le pays se dote d'un corps de jeunes savants, formés à la rude discipline des mathématiques enseignées par les meilleurs mathématiciens du temps, Gaspard Monge (1746-1818), Adrien-Marie Legendre (1752-1833), Siméon Denis Poisson (1781-1840), André-Marie Ampère (1775-1836), à la ci-devant École royale du génie de Mézières (Louis-Étienne Malus (1775-1812)) et à l'École centrale des travaux public (Jean-Baptiste Biot (1774-1862), François Arago, Augustin Fresnel (1788-1827)) mais aussi sous

13. Jean-Luc Chappey, *La Révolution des sciences 1789 ou le sacre des savants*, Paris, Librairie Vuibert, 2020.

14. Jean Dhombres et Nicole Dhombres, *Naissance d'un nouveau pouvoir, sciences et savants en France (1793-1824)*, Paris, Payot, 1989.

15. Robert Fox, George Weisz, Hugh Richard Slotten (dir.), « Modern Science in National, Transnational, and Global Context - France During the Long Nineteenth Century », *The Cambridge history of science, Volume 8*, Cambridge University Press, 2020.

16. Bruno Belhoste, Francine Masson, Antoine Picon, *Le Paris des polytechniciens : des ingénieurs dans la ville (1794-1994)*, Paris, 1994 ; Bruno Belhoste, *La Formation d'une technocratie. L'École polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire*, Paris, Belin, 2003.

17. Si ce terme n'a pas droit de cité dans les dictionnaires, il apparaît régulièrement dans la littérature spécialisée.

la houlette des plus célèbres savants, Pierre Simon de Laplace (1749-1827), Claude-Louis Berthollet (1748-1822), au sein du cercle fermé de la Société d'Arcueil. La réorganisation des enseignements secondaire et supérieur, pendant les périodes révolutionnaire et post révolutionnaire a déjà fait l'objet de plusieurs études (Bruno Belhoste, Jean Dhombres, Jean-Luc Chappey). Le recrutement de cette élite scientifique où le principe du concours républicain s'associe au clientélisme (ma traduction de *patronage*) a aussi intéressé plusieurs auteurs (Robert Fox, Maurice Crowland)¹⁸. Si ces questions se voient créditées ici d'un rappel rapide mais nécessaire, le chapitre se construit autour de deux axes principaux. Le premier décrit les méthodes de la photométrie pratique, employées par Fresnel et Arago dans leurs expertises sur les projecteurs de phares. Le second axe se concentre sur la photométrie en lumière polarisée dont les premiers instruments sont construits par Arago et avec lesquels il fonde une nouvelle science : l'astrophysique.

La troisième partie s'intéresse à la confrontation des méthodes photométriques aux nouvelles sources d'éclairage : le gaz d'hydrocarbures et la lumière de l'arc électrique. La photométrie est mise à contribution pour comparer les pouvoirs éclairants des gaz d'éclairage issus de différents gisements : gaz de houille, gaz d'huile, gaz de résine, etc. Les ingénieurs de la jeune industrie gazière restent cependant circonspects quant à la valeur des résultats fournis par la méthode des ombres. La carbochimie naissante intervient qui apporte une méthode puissante, l'eudiométrie qui permet de vérifier la richesse en gaz oléifiant (l'éthylène) dans le combustible. La teneur de ce composé est réputée primordiale pour les vertus éclairantes. Ce chapitre met l'accent sur la façon dont les intérêts de l'industrie gazière déterminent les progrès d'une photométrie devenue industrielle. La politique publique de distribution du gaz d'éclairage et l'implication du pouvoir impérial dans la fixation du prix de la lumière sont des facteurs externes qu'il faut prendre en compte dans le processus de normalisation de la lumière industrielle et la création de la métrologie photométrique.

La lumière électrique, celle de l'arc voltaïque ne connaît pas la même prospérité que le gaz d'éclairage. Elle fait l'objet d'études théoriques visant à déterminer la nature du lien entre les deux agents lumineux et électrique. En France, Antoine-Philibert Masson veut établir les lois phénoménologiques dont dépend l'intensité de la lumière électrique et met au point un photomètre

18. Robert Fox, George Weisz, « France During the Long Nineteenth Century », *The Cambridge history of science*, Cambridge University Press, 2020 ; Robert Fox, George Weisz, *The Organization of Science and Technology in France 1808-1914*, Cambridge University Press, Paris, Éditions de la Maison des Sciences de Homme, 1980 ; Maurice Crowland, *The Society of Arcueil. A view of French Science at the time of Napoléon I*, London, Heinemann, 1967.

permettant la mesure de cette lumière brève. Les travaux de Masson, peu ou pas renseignés dans la littérature sont ici l'objet d'une attention particulière car ils offrent l'un des premiers exemples de photométrie en régime dynamique et de détermination de paramètres visuels, dans un tel régime.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la portée heuristique des méthodes photométriques dans le cas des sources de lumières colorées, problématique où se croisent les méthodes de la métrologie physique et celles d'une métrologie que nous qualifions de « sensorielle ». La comparaison des intensités lumineuses devient difficile pour un observateur en présence de lumières de couleurs différentes. Le photomètre doit prendre en compte les phénomènes physiologiques propres à la vision humaine comme l'effet Purkyně. Ce dernier affecte les résultats des comparaisons qui dépendent de la façon dont on a fait varier les niveaux d'éclairage. Il devient dès lors difficile de comparer entre eux les pouvoirs éclairants des différentes radiations du spectre solaire, par exemple. En France, à Marseille, une équipe associant le physicien Jules Macé de Lépinay et le médecin ophtalmologiste William Nicati s'attelle, de 1879 à 1883, à une importante collecte de données sur ces questions. Ces travaux n'ont pas suscité l'attention des historiens. L'analyse de ces recherches est d'autant plus importante qu'elles ont permis d'établir la courbe de variation du pouvoir éclairant en fonction de la longueur d'onde. L'exactitude des nombres obtenus par Macé de Lépinay et Nicati a pu être vérifiée par comparaison avec la courbe de visibilité $V(\lambda)$ de l'observateur standard de référence, courbe définie quarante ans plus tard, à l'occasion du congrès de la CIE, tenu à Genève en 1924.

Les définitions des grandeurs fondamentales de la photométrie et de l'étalon de lumière deviennent, à partir de l'Exposition internationale d'électricité de Paris, en 1881, des affaires d'État. Cette date signale le début d'une succession de congrès internationaux des électriciens, en vue d'aboutir à un accord pour la définition des unités électriques et pour celle de l'unité de lumière. Nombre de ces rassemblements se tiennent à Paris, sous le patronage d'Adolphe Cochery (1819-1900), ministre des Postes et des Télégraphes. Ce dernier confie à Jules Violle (1841-1923), professeur à la faculté des sciences de Lyon, la mission de faire aboutir ses recherches sur son étalon de lumière : la lumière émise par 1 cm^2 de platine incandescent, pendant sa solidification. La réception de l'idée de Violle, les essais pour sa réalisation dans les différents laboratoires nationaux sont examinés dans ce dernier chapitre qui met en évidence le malentendu certain, entre les différentes équipes internationales, sur les notions d'étalons primaire et secondaire. À la fin de l'été 1893, à l'occasion du Congrès des électriciens de Chicago, André Blondel, ingénieur employé au Service des phares et balises, propose, en complément de l'étalon

Violle, un étalon secondaire pour évaluer la lumière de l'arc électrique. Les recherches de Blondel, effectuées au Laboratoire central d'électricité (LCE) financé par la Société internationale des électriciens et celles de Violle, réalisées aux laboratoires du Cnam, du LCE et de l'École normale supérieure infirment l'idée hâtive, exprimée par Sean F. Johnston, d'une répugnance des universitaires français à l'encontre de la physique appliquée à l'industrie. Trois ans plus tard, Blondel présentera au Congrès de Genève son système des grandeurs photométriques, fondement du formalisme de la photométrie toujours en vigueur. Enfin, l'année 1900 verra la création de la Commission internationale de la photométrie (CIP) à l'occasion du Congrès des industriels du gaz, organisation mère de l'actuelle Commission internationale de l'éclairage (CIE). Les recommandations de ses experts participent à l'amélioration de l'étalon de lumière, la candela, conservée par le Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres, dans la région de Paris.

Chapitre 1

Un *nouvel Art*

La temporalité de cette histoire de la photométrie au XIX^e siècle ne peut débiter à l'année 1800. Cette science n'est alors pas nouvelle. C'est bien le siècle précédent qui peut revendiquer la naissance d'un « nouvel art » avec « la Méthode de comparer par le calcul et par l'expérience les diverses forces de la lumière »¹. Il convient avant tout d'inventorier, sans prétendre à l'exhaustivité, les legs d'auteurs importants, legs qui seront utilisés avec profit par les « photomètres » du XIX^e siècle. L'historiographie de la photométrie à ses commencements met en lumière trois auteurs majeurs dont seront rappelés dans ce premier chapitre les apports.



fig. 1.1 – Portrait de Pierre Bouguer.
Par Jean-Baptiste Perroneau,
Musée du Louvre.

La première section est consacrée au Français Pierre Bouguer (fig.1.1) souvent considéré comme le *père* de la photométrie : il a en effet, dans un petit ouvrage publié en 1729, formulé les pratiques de ce qu'il nomme « la gradation de la lumière ». La mesure de l'intensité lumineuse se fait par comparaison de deux lumières en affaiblissant ou en faisant croître l'une d'elle jusqu'à obtenir leur égalité visuelle. Il applique ce principe à divers problèmes relatifs, entre autres, à la transparence et à l'opacité des corps. Il établit le premier la loi de décroissance exponentielle de l'intensité avec l'épaisseur traversée d'un milieu transparent, loi injustement attribuée à l'un de ses successeurs, Jean-Henri Lambert (1728-1777).

1. Pierre Bouguer, *Essai d'Optique sur la gradation de la lumière*, Jombert, Paris, 1729.

Ce dernier, auquel est consacrée la deuxième section, naît un an avant la publication par Bouguer de son Essai. Dans son traité publié en 1760 et en latin, le natif de Mulhausen va définir avec rigueur les premiers principes de la photométrie — il semble qu’il ait inventé le mot — et démontrer les théorèmes qui s’en déduisent comme le géomètre qu’il est. S’il emprunte peut-être à Bouguer l’expression « gradation de la lumière », il ne fait pas mention du travail du Breton car il manque, selon lui, à la photométrie l’instrument qui indiquera de manière directe l’intensité d’une lumière comme une balance indique la masse et un thermomètre la température.

Enfin, la troisième section s’emploie à montrer les efforts déployés par Benjamin Thompson, Comte Rumford (1753-1814) pour développer une photométrie pratique, appliquée à la résolution des problèmes d’éclairagisme. La section montre comment, en appliquant un principe découvert par Bouguer, Thompson conçoit, pour l’éclairage de ses ateliers, un modèle de photomètre qui sera fréquemment utilisé au service de l’industrie, au siècle suivant.

1.1 Pierre Bouguer : inventer un *nouvel art*

Il est intéressant de se pencher un moment sur cette personnalité scientifique encore méconnue, malgré les travaux que lui ont consacrés plusieurs auteurs comme Roland Lamontagne², Gilles Maheu³, Danielle Fauque⁴ et Jean-Édouard Morère⁵. Pierre Bouguer naquit en 1698, au Croisic, en Basse Bretagne, où son père occupait la charge de professeur d’hydrographie. Selon l’éloge que fit de lui Jean-Paul Grandjean de Fouchy (1707-1788), secrétaire perpétuel de l’Académie royale des sciences, il hérita de son père le goût des mathématiques et des sciences :

(...) la langue de ces sciences (l’astronomie et l’hydrographie) devint presque sa langue maternelle, et les premiers amusements de son enfance furent des instructions, circonstance qui ne contribua pas peu à développer de bonne heure les talents qu’il avait pour les hautes sciences.⁶

2. Roland Lamontagne, *La vie et l’œuvre de Pierre Bouguer*, Presses universitaires de Montréal, PUF, Paris, 1964.

3. Gilles Maheu, « Bibliographie de Pierre Bouguer (1698-1758) », *Revue d’histoire des sciences et de leurs applications*, tome 19, num. 3, 1966, p. 193-205.

4. Danielle Fauque, « Pierre Bouguer, figure emblématique ou savant singulier ? », *RHS*, 2010, vol. 63, num. 1, p. 5-21.

5. Jean-Édouard Morère, « La photométrie, les sources de l’Essai d’optique sur la gradation de la lumière de Pierre Bouguer, 1729 », *Revue d’histoire des sciences et de leurs applications*, vol. 18, num. 4, 1965, p. 337-384.

6. J.P. Grandjean de Fouchy, « Éloge de M. Bouguer », *HARS*, Paris, 1758, p. 127-136.

Prosper Jean Levot (1801-1878) raconte avec lyrisme et en reprenant les termes de Fouchy, les exploits intellectuels du jeune Bouguer qui, dès l'âge de quinze ans, fut jugé digne de succéder à son père⁷. Sur cet épisode qui semble révélateur du népotisme de ce temps, l'enquête minutieuse de Danielle Fauque donne un tout autre éclairage⁸. L'hydrographie est l'art de la navigation « par règles et principes ». La formation des « pilotes » qui ont la responsabilité d'un vaisseau et de son équipage est un enjeu très important pour les autorités de l'époque qui ne souhaitent pas la confier à des professeurs incompetents. Cette nomination montre bien la précocité scientifique du jeune Bouguer et son impressionnante connaissance des mathématiques.

Pierre Bouguer est donc d'abord un professeur d'hydrographie. Il participe dans la première moitié de son siècle à l'établissement des principes régissant la construction des navires et se fait très tôt connaître des membres de l'Académie royale des sciences et en particulier de Monsieur de Mairan. À partir de 1727 — Bouguer n'a que vingt-neuf ans — ce ne sont pas moins de trois prix qu'il décroche successivement pour les ouvrages suivants : 1727, *De la mâture des vaisseaux* ; 1729, *De le manière d'observer exactement sur la mer la hauteur des astres* ; 1729, *De la méthode d'observer en mer la déclinaison de la boussole*. La lecture de ces pièces primées révèle le style et la méthode de Bouguer.⁹ Dans le domaine de la construction des vaisseaux où régnait l'empirisme des marins, il apporte les méthodes scientifiques, la puissance des mathématiques et de ses derniers développements¹⁰. Son calcul du point *vélique*¹¹ utilise les équations des coniques, les calculs différentiel et intégral, c'est à dire les techniques de l'analyse mathématique les plus récentes à son époque. Il cite à ce sujet l'*Analyse démontrée*, ouvrage du Père Charles-René Reyneau¹², mais, comme le souligne encore Danielle Fauque¹³,

7. Prosper Jean Levot, *Biographie bretonne*, Vannes, Cauderan et Paris, Dumoulin, 1852, p. 153-156.

8. Danielle Fauque, « Du bon usage de l'éloge : Cas de celui de Pierre Bouguer/ *On the good use of eulogies : The case of Pierre Bouguer* », *RHS*, 2001, Tome 54, num. 3, p. 351-382.

9. Sur les prix annuels de l'Académie royale des sciences, voir la récapitulation qui en est faite par Gilles Maheu, « La vie scientifique au milieu du XVIIIe siècle : Introduction à la publication des lettres de Bouguer à Euler. », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, 1966, vol. 19, n° 3, p. 206-224 ; sur le second de ces prix (1729), lire aussi Arnaud Mayrargue, « De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres », *RHS*, 2010, Tome 63, num. 1, p. 67-91.

10. Pierre Bouguer, *De la mâture des vaisseaux*, chez Claude Jombert, Paris, 1727.

11. Le point vélique est le lieu d'application de la poussée vélique, c'est à dire l'effort du vent sur une voile.

12. Charles-René Reyneau, *Analyse démontrée ou la méthode de résoudre les problèmes des mathématiques*, chez Jacques Quillau, Paris, 1708.

13. Danielle Fauque, 2001, [Fau01], p.365.

on ignore si c'est bien le Père Reyneau qui a formé Bouguer aux techniques mathématiques modernes.

En 1735, Pierre Bouguer, associé géomètre de l'Académie, s'embarque avec Louis Godin (1704-1760), Joseph de Jussieu (1704-1779) et Charles-Marie de La Condamine (1701-1774) à destination du Pérou. L'objectif de cette expédition géodésique, commandée par le Roi Louis XV, est d'établir la « Figure de la terre » en mesurant, sur l'équateur, un degré d'arc du méridien terrestre. La comparaison avec la mesure du degré d'arc, effectuée par Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) en Laponie, confirmera l'aplatissement de la terre au pôle, prévu par la théorie newtonienne. Outre que ces mesures doivent apporter une réponse à une fameuse controverse entre cartésiens, dont l'astronome Cassini¹⁴, et newtoniens, il s'agit avant tout pour Bouguer d'améliorer les conditions de navigation.

S'il avoit été nécessaire pour la perfection de la Navigation de déterminer la grandeur de la Terre ou la grandeur moyenne de ses degrés, il n'étoit pas moins utile de connoître sa figure avec une certaine exactitude. On ne pouvoit pas distinguer si les accidens qui n'arrivent encore que trop souvent en Mer, devoient être imputés à la négligence des Pilotes qui n'observent pas assez scrupuleusement les préceptes de leur art, ou si le défaut ne vient pas de plus loin & de ce que l'Art même est trop imparfait, lorsqu'il fonde sur la sphéricité de la Terre la plûpart des maximes qu'il propose. C'est ce qu'il falloit nécessairement vérifier, & dût-on apprendre que l'irrégularité de la figure étoit insensible, il ne falloit pas négliger de s'en assurer.¹⁵

Ce portrait d'un Bouguer, estimé de ses pairs, travaillant avec constance à l'amélioration des techniques de navigation, est cependant nuancé par l'opinion de Guy Boistel¹⁶. Ce chercheur dépeint un expert sûr de son savoir, enfermé dans ses certitudes qui, dans la question de la mesure des longitudes, ne croit pas à la mise au point d'horloges de marine fiables. La création du premier chronomètre de marine par John Harrison (1693-1776), en 1767, constituera pourtant une avancée technologique considérable pour la navigation.

14. Il s'agit ici de Jacques Cassini, dit Cassini II (1677-1756).

15. Pierre Bouguer, *La Figure de la Terre, Relation abrégée du voyage fait au Pérou*, chez Charles-Antoine Jombert, Paris, 1749, p. ij-ijj.

16. Guy Boistel, « Pierre Bouguer, commissaire pour la marine et expert pour les longitudes : un opposant au développement de l'horlogerie de marine au xviii^e siècle », *RHS*, 2010, Tome 63, num. 1, p. 121-159.

L'essai d'Optique

En s'appuyant sur la bibliographie dressée par Gilles Maheu¹⁷, Danielle Fauque souligne que l'optique, et en particulier la photométrie, sont une petite partie de l'œuvre de Pierre Bouguer — cette auteure avance le chiffre de 15% seulement de son œuvre écrite¹⁸. Pourtant l'ouvrage de Bouguer : *Essai d'Optique sur la gradation de la lumière*, publié en 1729, auquel succédera le traité du même nom, publié à titre posthume en 1760, peut être vu comme le manifeste d'un « *Nouvel Art* ». C'est ainsi que le qualifie Bouguer dans sa dédicace au Comte de Maurepas où il livre les intentions de son essai :

Il contient comme un nouvel Art : puisqu'au lieu qu'on ne s'étoit attaché jusqu'ici dans cette partie de Mathématique, qu'à examiner la situation ou direction des raïons, ou tout au plus la décomposition que souffre la lumière lorsqu'elle se divise dans les couleurs primitives ; j'entreprends de donner une Théorie sur la Transparence et sur l'Opacité des corps, avec la Méthode de comparer par le calcul et par l'expérience les diverses forces de la lumière.¹⁹

L'optique des siècles précédents s'était surtout attachée à l'étude de la trajectoire des rayons lumineux à travers les milieux transparents — diaphanes — et à la rencontre de miroirs. Elle se limitait donc à la *catoptrique*, ou l'étude de la réflexion de la lumière, et à la *dioptrique* ou étude de sa réfraction par les dioptries²⁰. Le problème de la mesure de la lumière n'était pourtant pas ignoré des savants, ne fût-ce que par l'expérience immédiate, les observations astronomiques et celles des *spectacles* du ciel. Dans l'étude qu'il consacre aux « sources de l'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière », Jean-Édouard Morère offre un panorama rapide mais complet des approches successives de la question de la *mesure* de la lumière, guidées surtout par les aspects des corps célestes, depuis les Grecs jusqu'au siècle de Bouguer.

(...) on compare l'intensité de la lumière solaire et celle des étoiles, les variations d'intensité entre le centre et les bords des disques solaire et lunaire, on cherche les raisons des variations de luminosité de la Lune, l'origine de sa lumière cendrée, on précise la distinc-

17. Gilles Maheu, [Mah66a].

18. Danielle Fauque, 2010, [Fau10], p. 6.

19. Pierre Bouguer, *Essai d'Optique sur la gradation de la lumière (Essai par la suite)*, Claude Jombert, Paris, 1729, Epistre.

20. Surface de séparation entre deux milieux transparents.

tion de la lumière propre des étoiles et de la lumière réfléchie des planètes, on constitue une théorie quantitative des crépuscules.²¹

Mais il manque encore à l'étude des lumières du ciel les moyens d'une analyse quantitative, insuffisance que déplorent en particulier les astronomes dont Adrien Auzout (1622-1691). Bouguer rapporte que : « M. Auzout se plaignoit dans une de ses lettres, il y a plus de soixante ans de ce qu'on ne pouvoit pas déterminer de combien de degrez une lumière surpassoit une autre, quoiqu'on scût certainement qu'elle fût plus forte. »²². L'essai du Breton semble arriver à point nommé. Ne pas se contenter d'observations qualitatives donc, définir les méthodes pour des résultats reproductibles, tels sont les buts que se fixe Bouguer car comparer deux lumières, celles de Sirius et du Soleil par exemple, ne peut se faire à *l'estime* selon la méthode qu'indique Christiaan Huygens (1629-1695) dans son *Cosmotheoros* : il y faut, comme dans l'art de la navigation, des instruments et des principes mathématiques. Familier de leur usage, le professeur royal d'hydrographie peut s'attaquer à des problèmes complexes : mesurer l'affaiblissement de la lumière à la traversée des milieux diaphanes ou corriger, pour évaluer correctement la hauteur des astres, les erreurs systématiques dues à la réfraction par l'atmosphère terrestre. Il en explique encore les motivations :

On y fut porté par un Mémoire qui parut dans le volume de 1721, des Mémoires de l'Academie Royale des Sciences, & dans lequel M. de Mairan suppose qu'on sache le rapport des lumières du Soleil aux deux hauteurs méridiennes des solstices d'Eté & d'Hyver. (...) il ne me fut pas possible de résister plus longtems à l'envie de chercher quelques Moïens de faire les observations qu'il indique.²³

Membre de l'Académie, Jean-Jacques Dortous de Mairan (1678-1771) avait déjà publié en 1719 un mémoire « Sur le froid de l'Hiver et le chaud de l'Eté ». Dans le volume de 1721, il pose le problème suivant :

Le rapport de deux degrez ou quantités de lumiere du Soleil vû sur l'horison à travers l'Atmosphere, à deux hauteurs différentes, & connuës, étant donné : trouver quelle partie de la lumière absoluë du Soleil nous est interceptée par l'Atmosphere, à telle hauteur qu'on voudra.²⁴

21. J. E. Morère, [Mor65], p. 341.

22. P. Bouguer, *Essai*, préface, p. iii.

23. P. Bouguer, *Essai*, préface, p. v.

24. Jean-Jacques Dortous de Mairan, « Eclaircissement sur la cause générale du Froid en Hiver & de la Chaleur en Eté », *MARS*, 1721, p. 4-17.

C'est donc à ce problème que Bouguer s'attaque et auquel il apporte une solution complète en fournissant, à la fin de son essai, la « Table des masses d'air contenuës dans l'Atmosphere, & des forces qu'a la lumiere des Astres, après avoir traversé ces masses. »²⁵. L'analyse de l'ouvrage donnée dans le Journal des Scavans rappelle, ici encore, la supériorité des méthodes de Bouguer sur l'empirisme mis en œuvre par d'autres auteurs. Dès 1699, le R.P. François Marie, capucin (1634-1714) avait fait état, auprès de l'Académie royale des sciences, de la création d'un « lucimètre » fondé sur l'empilement de milieux transparents. La comparaison que fait le Journal des Scavans est sans appel :

Car nous ne pensons pas que le lucimètre du R.P. François-Marie Capucin, qui parut en 1700 & dont notre journal rendit compte au Public, le 15^e Novembre de la même année, doive nous empêcher de regarder le recherche de M. Bouguer comme toute nouvelle ; tant par les moyens que les expériences qu'il y employe, que par l'Analyse, les calculs, & la Géométrie exacte qui l'accompagne.²⁶

La loi de la raison inverse des *quarrez* de la distance

Cette loi s'impose comme l'un des fondements de la photométrie de Bouguer qui en donne l'énoncé dès la première page de l'essai. Elle est fondée sur le principe de la propagation rectiligne des rayons lumineux, admis et rappelé par Bouguer :

Une des principales propriétés de la lumière est d'être distribuée en plusieurs rayons qui avancent tous chacun à part en ligne droite, & qui forment une espece de pyramide dont le corps lumineux est le sommet. Cette propriété est cause que la lumière devient plus faible, à mesure qu'on la reçoit à une plus grande distance du corps lumineux. (...) & la force de la lumière doit suivre la raison inverse des *quarrez* de la distance au corps lumineux ; parce que les espaces dans lesquels les rayons se trouvent répandus augmentent en raison directe de ces mêmes *quarrez*.²⁷

L'histoire de cette loi est déjà relativement ancienne au moment où Bouguer l'énonce de nouveau. Sa filiation est bien renseignée par plusieurs auteurs qui ont répertorié les travaux où cette loi apparaît de façon explicite. Ainsi

25. P. Bouguer, Essai, p. 160.

26. « Essai d'Optique sur la gradation de la lumière », *Le Journal des Scavans*, février 1730, p. 67-73.

27. P. Bouguer, Essai, p. 1-2.

Ariotti et Marcolongo placent une origine de cette loi dans les publications de Johannes Kepler (1571-1630) et du Jésuite François d’Aguilon (1567-1617)²⁸. François d’Aguilon avait ainsi tenté d’apporter des réponses à cette question dans son *Optique* publiée en 1613²⁹. Képler, quant à lui, avait observé cette variation de l’intensité de la lumière comme l’inverse du carré de la distance à la source³⁰. Marin Mersenne (1588-1648) en donne également une formulation dans ses *Questions inouyes ou recreation des scavans*, ouvrage publié en 1634, quand il apporte la réponse à la question XIII : « Peut-on sçavoir en quelle proportion la lumiere se diminue ou s’augmente en s’esloignant ou en s’approchant du Soleil, ou de quelque autre luminaire. »

Si la lumiere a 64. degrez de force à un pas, ou à telle autre distance du Soleil, ou de la chandelle que l’on voudra, elle sera quatre fois moindre à deux pas, seize fois moindre à quatre pas, & soixante-quatre fois moindre à huit pas du luminaire, & ainsi consequemment : car sa foiblesse ou sa diminution est toujours en raison doublée de ses eloignemens...³¹

L’idée d’une *pyramide* formée par le foisonnement des rayons émis par la source semble même extraite de la proposition VIII : « *Lux defluens à lucido extrailud infinitis pyramidibus terminatur.* »³² du *De natura lucis* d’Ismaël Boulliau (1605-1694). Se trouve également chez ce dernier auteur la proposition (il s’agit de la proposition XXVII) : « *Densitates superficierum luminis, sunt ad inuicem ut rationes dupla distantiarum superficierum à corpore lucido.* »³³, soit : la *densité* des surfaces lumineuses décroît comme l’inverse du carré (*de la raison double*) de la distance de ces surfaces à la source (ma traduction).

Boulliau utilise pour sa démonstration (voir fig.1.2) l’idée de *densité* de lumière : « *quare ut superficies FG ad superficiem DE ita densitas DE ad densitatem FG alternatim* ». Les *densités* sont donc dans le rapport inverse des surfaces. Et comme, ajoute Boulliau, « *superficies autem sunt ad se inuicem in dupla ratione linearum homologarum ad ipsas pertinentium* », les

28. Piero E. Ariotti and Francis J. Marcolongo, « The law of illumination before Bouguer (1729) : Statement, restatements and demonstration. », *Annals of Science*, 1976, Vol. 33, p. 331–340.

29. François d’Aguilon, *Opticorum Libri Sex philosophis juxta ac mathematicis utiles*, Anvers, 1613.

30. Voir à ce sujet Olivier Darrigol, [Dar12], p. 110-116.

31. Marin Mersenne, *Questions inouyes ou recreation des scavans*, Paris, Jacques Villery, 1634, p. 53-54.

32. La lumière à l’extérieur de la source se déploie dans des pyramides infinies. (ma traduction)

33. Ismaël Boulliaud, *De natura lucis*, Paris, 1638, p. 41-42.

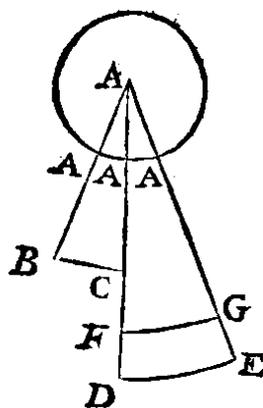


fig. 1.2 – Loi du carré inverse de la distance selon Boulliau, *De natura lucis*, p. 41.

surfaces sont proportionnelles aux carrés des rayons qui leur parviennent, les *densités* de lumière sont en raison inverse du carré des distances, ce qui démontre la loi. De son côté, Bouguer fait un raisonnement similaire en partant de *sa pyramide* :

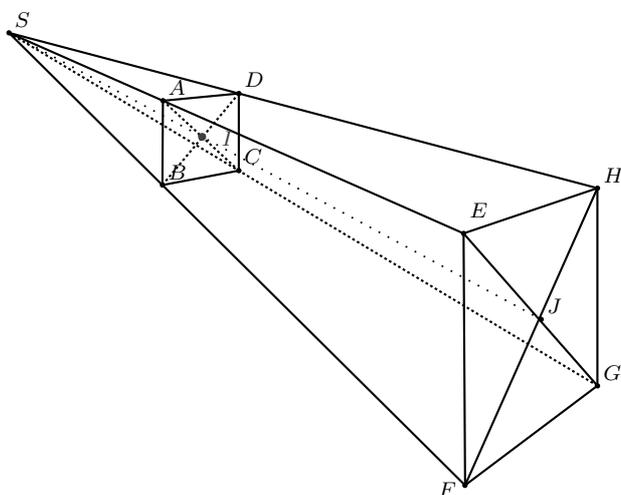


fig. 1.3 – Illustration de la loi des distances : les rayons émis par la source S, se répartissent dans la pyramide, en éclairant les surfaces ABCD et EFGH qui reçoivent la même quantité de rayons. Mais les forces (ou *densités*) de lumière, sur chacun de leurs points sont en raison inverse des carrés des distances SI et SJ.

Si on se met pareillement à une distance dix fois plus grande, les rayons qui vont toujours en s'éloignant les uns des autres, occuperont un espace cent fois plus grand, & chaque endroit sera

cent fois moins éclairé. En un mot les rayons forment toujours, comme nous l'avons dit, une pyramide dont le corps lumineux est le sommet, & dont la base est la surface sur laquelle on reçoit la lumière. Or comme cette base augmente précisément en même raison, que le carré de la distance au corps lumineux, & qu'elle ne reçoit cependant toujours dans toute son étendue que le même nombre de rayons, il est sensible qu'elle en recevra moins dans chaque de ses points, & que la force de la lumière sera précisément plus petite en même raison, que le carré de la distance sera plus grand.³⁴

La description quantitative de la lumière fait donc intervenir chez Bouguer une grandeur *extensive*, le « nombre de rayons » et une grandeur *intensive*, la « force » de la lumière qui, chez Boulliau, est représentée par le terme « *densitas* ».

Égalisation visuelle.

La loi de la raison inverse du carré de la distance étant bien établie, Bouguer explique que l'on dispose d'une méthode simple de changer la force d'une lumière et surtout de connaître en quelles proportions. Cette méthode de « gradation de la lumière » est la seule qu'il envisage :

Cela supposé, nous pourrions toujours faire changer très-aisément la force de la lumière en quelle proportion nous voudrions : nous n'aurons qu'à la recevoir à différentes distances du corps lumineux, ou bien à différentes distances du foyer dans lequel nous l'aurons réunie, en nous servant d'un verre convexe. On ne peut rien concevoir de plus simple ni de plus connu que ce moyen. Cependant nous n'en employerons point d'autres pour mesurer la force de la lumière,...³⁵

Il reste pour l'auteur de l'Essai à décrire l'*instrument* de cette mesure qui procède nécessairement par comparaison avec une lumière fixe. Certainement habitué aux observations du ciel et des astres, le professeur d'hydrographie a compris l'impossibilité d'évaluer les rapports de « forces » de deux lumières différentes. Sa photométrie repose sur le jugement par l'œil de l'égalité d'apparence des forces des deux lumières. Cela s'appelle, en langage métrologique, une « méthode de zéro ». Elle implique, l'une des sources restant constante,

34. P. Bouguer, Essai, p. 3.

35. P. Bouguer, Essai, p. 4.

le réglage de l'autre source par un procédé de « gradation de la lumière » dont celui précédemment décrit.

Pour découvrir en général le rapport de deux lumières, il n'y a qu'à faire augmenter ou diminuer l'une, par le moyen que nous venons d'indiquer, jusqu'à ce qu'elles paroissent également fortes, & on jugera ensuite du rapport qu'elles avoient, par le changement qu'il a fallu leur faire souffrir pour les réduire à l'égalité. (...) Car de tous les rapports, ce n'est que l'égalité qu'on peut remarquer en cette matière, avec assez d'exactitude; & on se tromperoit extrêmement dans tous les autres rapports.³⁶

Mais qu'entendre par « jusqu'à ce qu'elles paroissent également fortes » ? Il ne peut s'agir que de l'égalité d'apparence des deux lumières, ce qui correspond à une égalisation visuelle. Or la perception d'une lumière fait intervenir un attribut d'*intensité* ou de *luminosité* correspondant à ce que Bouguer désigne par « force » mais aussi un attribut de *chromaticité*, censé représenter la *couleur* de la lumière, attribut dont Bouguer ne dit mot. La photométrie de Bouguer est donc une photométrie *blanche* ou *homochrome*. Une telle égalisation peut se comprendre par le schéma suivant :

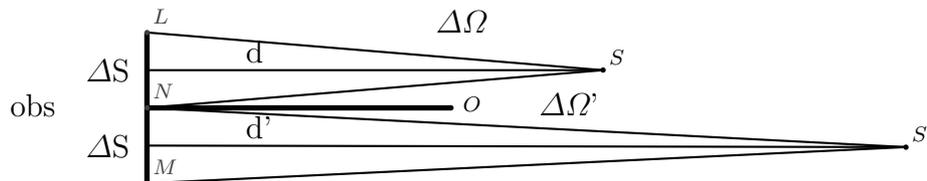


fig. 1.4 – Expérience d'égalisation visuelle. D'après G. Dévoré et R. Annequin, *Cours de physique, Optique II*, Librairie Vuibert, Paris, 1970, p. 107.

Les deux sources lumineuses S et S' sont censées émettre des lumières de même couleur³⁷ Les sources éclairent, en direction normale, un écran trans lucide LM séparé en deux parties de même surface ΔS . Un écran opaque NO empêche la superposition des lumières. L'observateur règle les distances d

36. P. Bouguer, *Essai*, p. 5.

37. La comparaison de sources de couleurs différentes est l'objet de la photométrie dite « hétérochrome » (voir infra, chapitre 4) qui est ici laissée de côté.

et d' entre les sources S et S' et l'écran, de façon que les aspects des deux plages soient identiques. L'écran semble alors uniformément éclairé. Différents couples de valeurs de d et d' assurent l'égalisation entre les deux plages éclairées. On vérifie alors que

$$\left(\frac{d}{d'}\right)^2 = \frac{I}{I'}$$

est un rapport constant que l'on peut définir comme le rapport des « forces » des deux lumières. Bouguer tire cette conséquence :

Il est vrai que nous ne réussissons pas à connoître la force absolue de la lumière; nous n'en découvrirons toujours la force que de manière relative.³⁸

Cela signifie que l'évaluation de la force de la lumière se fait toujours par sa comparaison avec une source de référence. Or la métrologie de Bouguer ne cherche pas à créer les étalons de lumière indispensables à la définition d'une unité de *force* lumineuse. Elle définit une source de référence au cas par cas : pour les observations des sources terrestre, c'est une bougie ou un flambeau, pour les observations astronomiques, la Lune. La méthode ainsi définie, Bouguer, en savant soucieux de la reproductibilité de ses expériences, fournit quelques recommandations :

Il suffit en tout cela que les distances du corps ou du point lumineux ne soient pas excessives, afin que la lumière ne diminue sensiblement que par sa seule divergence, & non pas par la seule rencontre des parties grossières de l'air, qui pourroient intercepter plusieurs rayons dans un plus long trajet.³⁹

Mais il préconise aussi, à l'inverse, d'être suffisamment éloigné de la source afin de pouvoir toujours la considérer comme ponctuelle et de « pouvoir négliger sans erreur sensible l'étendue qu'a toujours le foyer du miroir ou du verre ardent. »⁴⁰ Dans le cas de la comparaison de lumières qui ne paraissent pas en même temps, il utilise une troisième source auxiliaire, ce qui l'autorise à critiquer la méthode utilisée par Huygens, dans son *Cosmotheoros* pour comparer les éclats de Sirius et du Soleil.

38. P. Bouguer, *Traité d'optique sur la gradation de la lumière*, (*Traité par la suite*), La Caille, Paris, 1760, p. 3.

39. P. Bouguer, *Essai*, p. 4.

40. P. Bouguer, *Traité*, p. 7.

Il n'y a dans cette méthode aucune difficulté, & il ne peut s'en trouver que lorsque les deux lumières ne paroissent pas en même tems, & qu'on ne peut pas les comparer immédiatement l'une avec l'autre. Mais on peut toujours alors les comparer chacune séparément avec la lumière d'un même flambeau ou d'une même bougie.⁴¹

Il ne s'agit là, rien moins que de l'énoncé du principe de transitivité appliqué aux égalisations visuelles : A, B et C représentant trois sources de lumières et \equiv signifiant l'égalité d'apparence visuelle :

$$\text{Si } A \equiv B \text{ et si } B \equiv C \text{ alors } A \equiv C$$

Bouguer incite également à répéter plusieurs fois les expériences : « Mais si on répète plusieurs fois les mêmes observations & qu'on les fasse avec soin, il sera facile de distinguer celles qui se ressentiront moins des irregularitez étrangères. »⁴² Il réalise ainsi, selon le langage métrologique actuel, les tests de *répétabilité* en renouvelant les mesures dans les mêmes conditions expérimentales, avec le même observateur (lui-même). Et s'il mobilise plusieurs observateurs : « Je consultois aussi les yeux de toutes les personnes qui étoient présentes. »⁴³ c'est seulement pour réaliser les tests de *reproductibilité*. Mais il ne s'agit en aucun cas pour Bouguer de tirer des conclusions sur la vision humaine. Il n'utilise l'œil qu'en tant que moyen objectif de comparaison.

Photomètre

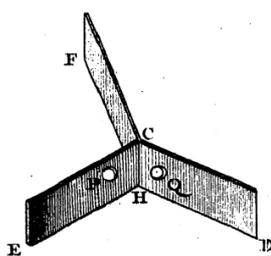


fig. 1.5 – Photomètre de Pierre Bouguer. Traité, fig.1, planche I.

Dans l'édition plus tardive du Traité, Bouguer décrit de façon très détaillée les appareils et les conditions des mesures par ces égalisations visuelles.

41. P. Bouguer, Essai, p. 6.

42. P. Bouguer, Essai, p. 7.

43. P. Bouguer, Essai, p. 12.

On peut pour recevoir les deux lumières qu'on veut comparer, se servir d'un simple morceau de carton ECD (fig.1.) qui aura un pli en CH, afin qu'on puisse exposer chaque moitié de la surface plus perpendiculairement à chaque lumière. Tout ce morceau de carton sera noir; mais il aura deux trous exactement de même grandeur, comme de 3 ou 4 lignes de diamètre⁴⁴, sur lesquels on appliquera du papier pénétré d'huile, ou deux morceaux de verre parfaitement égaux, & rendus également mats ou blancs avec de l'émeri ou du grès.(...) Un second morceau de carton FC servoit de diaphragme, & empêchoit que les deux lumières ne se confondissent avant que d'éclairer les deux petites surfaces P & Q.⁴⁵

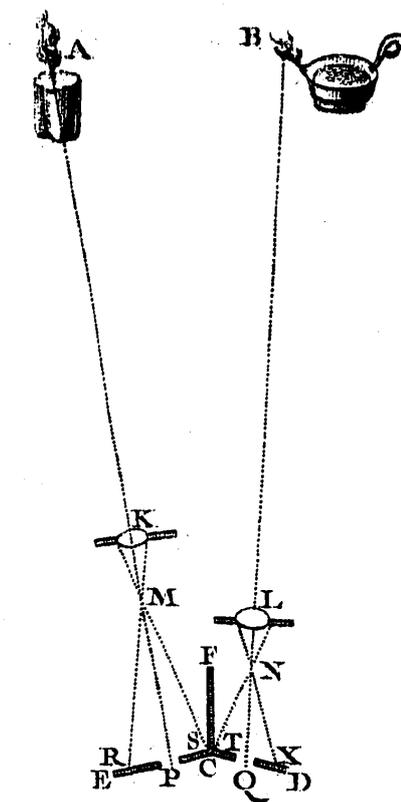


fig. 1.6 – Photomètre de Pierre Bouguer. *Traité*, fig.2, planche I.

La figure 1.6 montre en K et en L les verres lenticulaires et les ménisques

44. Une *ligne* est un douzième du *pied du Roi* qui au moment de son abolition mesurait 324,8 mm. Une ligne mesure donc en unité actuelle environ 2,256 mm.

45. P. Bouguer, *Traité*, p. 9-10.

utilisés par Bouguer pour s'affranchir des distances trop grandes nécessaires parfois à l'égalisation visuelle. Dans cette dernière configuration, Bouguer effectue les corrections imposées par les deux lentilles en mesurant les distances MP et NQ entre les foyers et l'écran d'observation, ou, ce qui revient au même, les diamètres des taches RS et TX

Si le premier diamètre est de 40 lignes, j'en multiplie le carré 1600 par celui 81 de AK , & j'ai 129600. Je fais la même opération pour l'autre lumière. Je multiplie le carré 100 de BL par celui du diamètre TX du cône lumineux dont N est le sommet, & si ce diamètre est de 16 lignes, il me viendra 25600 au produit.⁴⁶

Bouguer se permet même le luxe d'ajouter : « Il est bon de remarquer que, comme il ne s'agit ici que de rapports, il n'est pas absolument nécessaire d'employer les mêmes mesures pour exprimer toutes ces dimensions. »⁴⁷ Là encore, les résultats de Bouguer sont des valeurs relatives. Son photomètre est un comparateur de lumières qui ne permet pas d'exprimer leurs forces de manière absolue.

De la transparence et de l'opacité

Dans toute la suite de l'Essai, Bouguer va mettre en application les principes des mesures photométriques, exposés dans la section I, pour l'étude de la transparence des corps. Son ambition est de définir une grandeur caractéristique de chaque corps qu'il appelle « transparence spécifique » et d'établir la loi générale décrivant la diminution de la lumière quand elle traverse les corps diaphanes. Il s'agit évidemment d'apporter la réponse au problème posé par Dortous de Mairan et d'établir, par le calcul cette fois, la table des « forces de la lumière des astres après la traversée de telle masse d'air. »⁴⁸

Bouguer propose une théorie complète de la transparence, esquissant d'abord une interprétation au niveau microscopique de l'interaction entre la lumière et les grains de matière. Sa description semble s'inscrire dans la lignée mécaniste, initiée par un Descartes (René Descartes 1596-1650) ou un Malebranche (Nicolas Malebranche, 1638-1715). La lumière a besoin d'un milieu de propagation élastique, afin de transmettre aux grains de matière la pression exercée par la lumière. « Éther », « air subtil » sont les termes désignant ce milieu aux propriétés contradictoires, imprégnant tout l'espace

46. P. Bouguer, *Traité*, p. 12.

47. P. Bouguer, *Traité*, p. 12.

48. P. Bouguer, *Essai*, p. 160.

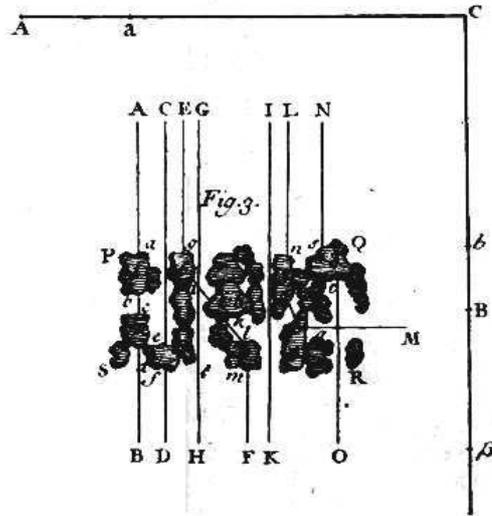


fig. 1.7 – La transmission de la lumière dans les milieux diaphanes selon Pierre Bouguer, Essai, fig.2, planche première.

et pourtant inobservable et impalpable⁴⁹. Bouguer émet ses doutes quant à l'idée couramment admise que les milieux transparents transmettent la lumière grâce à leurs « pores » remplis d'éther et d'air subtil et que leur degré de transparence réside « dans la plus grande ou dans la moindre quantité de pores ». Pour lui, la propagation lumineuse dans l'air ou les solides diaphanes s'explique par l'interaction des rayons lumineux avec les grains de matière. « Mais quoique ce sentiment soit reçu de la plupart des Physiciens, il nous semble qu'il faut que les parties solides transmettent elles-mêmes la lumière dans plusieurs rencontres. »⁵⁰ Et plus loin, il explique la propagation lumineuse par ces mots :

(...) nous pouvons prouver d'une manière directe, en supposant le sentiment du P. Malebranche sur la dureté des corps, que les parties grossières doivent transmettre la pression des rayons de lumière qui les rencontrent.⁵¹

Mais Bouguer ne se hasarde point sur la nature de la lumière ni sur la structure intime des milieux traversés. Reste à déterminer *la proportion selon*

49. Les physiciens classiques useront du concept d'éther, jugé indispensable à la propagation de la lumière, jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

50. P. Bouguer, Essai, p. 35.

51. P. Bouguer, Essai, p. 36.

laquelle la lumière diminue en traversant les milieux. Comme il sait bien le faire, Bouguer expérimente, modélise et met en équations le problème. Il obtient ainsi la loi décrivant la transparence : ce n'est pas selon une progression arithmétique que la lumière décroît en traversant des épaisseurs égales du milieu, mais selon une progression géométrique.

Ainsi les tranches égales ne doivent pas détruire des quantitez égales, mais seulement des quantitez proportionnelles. C'est à dire que si une certaine épaisseur intercepte la moitié de la lumière, l'autre épaisseur qui suivra la première, & qui lui sera égale, n'interceptera pas toute l'autre moitié, mais seulement la moitié de cette moitié & la réduira par consequent au quart (...) il est sensible que la lumière diminuera toujours en progression géométrique.⁵²

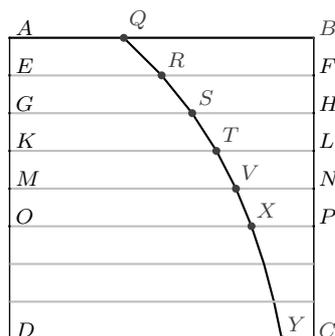


fig. 1.8 – Tracé de la « gradulucique » d'un milieu diaphane, d'après Bouguer, *Essai*, fig.4, planche première.

Les « forces » de lumière sont représentées par les segments QB, RF, etc.

Lorsqu'un faisceau de lumière parallèle pénètre le matériau ABCD (par la face AB sur la figure) « les forces qu'a la lumière, après avoir traversé différentes épaisseurs, peuvent être représentées par les ordonnées d'une *logarithmique* qui a pour axe l'épaisseur du corps. »⁵³ Cette courbe est en effet celle dont les ordonnées sont en progression géométrique lorsque ses abscisses sont en progression arithmétique⁵⁴. Bouguer appelle « climaphote » ou « gradulucique » cette courbe logarithmique dont le profil est caractéristique de la

52. P. Bouguer, *Essai*, p. 46.

53. P. Bouguer, *Essai*, p. 48.

54. La *logarithmique* désigne, selon l'habitude du XVIII^e siècle, la courbe exponentielle.

transparence du corps traversé. Il peut alors prendre pour principe la proposition suivante :

(...)lorsque la lumière traverse diverses épaisseurs d'un même corps, il y a toujours même rapport de la différence des logarithmes des deux ordonnées ou quantitez de lumière QB & RF à l'épaisseur BF qui est entre eux deux que de la différence des logarithmes de toutes autres ordonnées ou quantitez de lumière, à l'épaisseur correspondante.⁵⁵

Si nous appelons k le rapport en question, cela se traduit, dans la formulation actuelle, par :

$$\frac{\ln(QB) - \ln(RF)}{BF} = \frac{\ln(QB) - \ln(XP)}{BP} = k \quad (1.1)$$

Ainsi, si $QB = I_0$ représente l'intensité incidente sur la face AB et $RF = I(x)$ l'intensité après que la lumière a traversé une épaisseur $BF = x$ du corps diaphane, on retrouve l'expression moderne de la loi dite de « Beer-Bouguer-Lambert » qui relie *l'absorbance* d'un milieu transparent à l'épaisseur traversée.

$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{k}{2,303}x \quad (1.2)$$

Il est facile de montrer que le rapport k est égal à l'inverse de la sous-tangente de la logarithmique mesurée sur l'axe des ordonnées. Or, selon Bouguer, c'est à cette même sous-tangente que la transparence spécifique du corps est proportionnelle.

Ainsi les transparences spécifiques sont non-seulement proportionnelles aux diverses épaisseurs que la lumière a à traverser dans les différents milieux pour diminuer de la même quantité ; mais elles sont aussi proportionnelles aux sous-tangentes des logarithmiques qui appartiennent à ces milieux, ou qui servent de graduluciques.⁵⁶

Bouguer va plus loin encore et veut relier le degré de transparence à la densité et à la structure interne du corps :

55. P. Bouguer, Essai, p. 64-65.

56. P. Bouguer, Essai, p. 55-56.

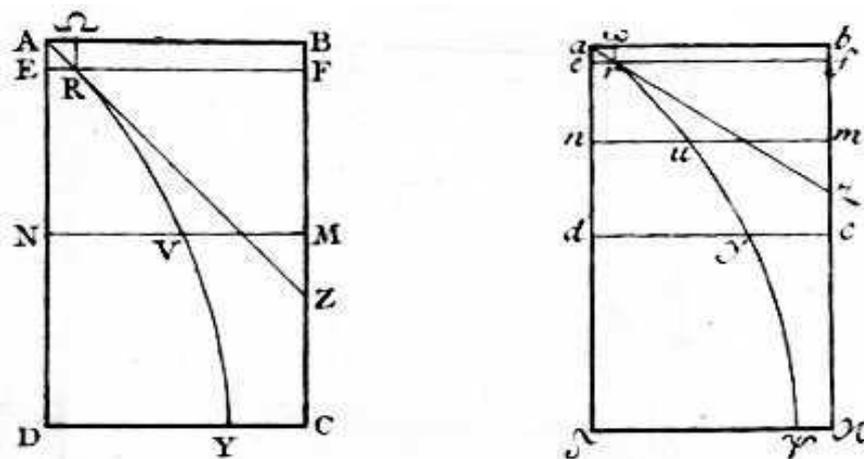


fig. 1.9 – Graduluciques de deux corps transparents. Le corps $ABCD$ est plus diaphane que le corps $abcs$ dans le rapport de BF à bf . Mais les sous-tangentes BZ et bz sont également dans le même rapport. Tiré de l'Essai, fig.6 et fig.7, planche première.

Il suit de tout cela, que dans les milieux dont les condensations sont différentes & dont les parties sont de différentes grosseurs, les transparences doivent être en raison composée de la raison directe des diamètres des parties & de la raison inverse des densitez.⁵⁷

Mais ni dans l'Essai ni dans le Traité n'est fait état de résultats expérimentaux reliant quantitativement la gradulucique à la structure intime des milieux transparents et en particulier à la concentration des substances absorbantes qu'ils contiennent. La description de Bouguer reste très vague, évoquant surtout « la grosseur de leurs grains de matière ». La découverte de la dépendance de l'absorbance avec la concentration sera le fait de August Beer (1825-1863), plus d'un siècle plus tard.

Bouguer et la sensation visuelle

Selon Jean-Édouard Morère, Bouguer n'a pas initié de recherche en optique physiologique. « Le projet de Bouguer, dit-il, est tout physique, il consiste à annuler l'œil dans l'expérimentation. »⁵⁸ Bouguer ne se serait donc pas intéressé à la sensation visuelle. Pourtant, à l'article I de la seconde section de son traité, Bouguer se montre précurseur en cherchant à déterminer « quelle force il faut qu'ait la lumière, pour qu'elle en fasse disparaître une autre plus faible. »⁵⁹. Cette démarche semble vraiment s'inscrire

57. P. Bouguer, Essai, p. 59-60.

58. J. E. Morère. [Mor65], p. 382.

59. P. Bouguer, Traité, p. 51.

dans les méthodes de la *psychophysique*, science dont on attribue la fondation à Gustav Theodor Fechner (1801-1887) en 1820. La grandeur que veut mesurer Bouguer est effectivement *le seuil différentiel de la sensation*⁶⁰ ou unité physiologique, grandeur fondamentale de la psychophysique.

Bouguer imagine le dispositif suivant : une source lumineuse (bougie) S1 projette en O1 l'ombre d'une tige placée à environ un *pied* d'un écran E parfaitement blanc.

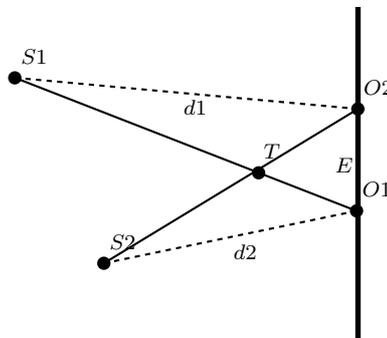


fig. 1.10 – Méthode de Bouguer pour déterminer le seuil différentiel de sensation. D'après Palaz, *Traité de photométrie industrielle*, p. 23.

De même une source lumineuse S2 (bougie « de même grosseur que la première ») projette en O2 l'ombre de la tige. L'opérateur éloigne ensuite la seconde source jusqu'à ce que l'ombre portée en O2 cesse d'être visible.

L'ombre étoit très sensible, lorsque je n'ai porté cette dernière bougie qu'à 4 ou 5 pieds de la surface. Tout l'espace que cette ombre occupoit, étoit cependant éclairé par la première ; mais à côté de cet espace, la lumière étoit augmenté d'un seizième ou vingt-cinquième partie par les rayons de l'autre bougie, & cette augmentation étoit très-sensible. Elle l'étoit encore un peu, lorsque je portai la seconde bougie à 6 ou 7 pieds ; & enfin elle disparut, ou pour m'expliquer autrement, toute la surface me parut d'une blancheur absolument uniforme, lorsque je mis cette même bougie à environ 8 pieds de distance. Ainsi la distinction, entre les

60. Le seuil différentiel peut être défini ici comme *la valeur limite que doit atteindre la différence des deux éclairagements pour que cette différence soit perceptible à la rétine*. Voir A. Palaz, *Traité de photométrie industrielle*, Paris, Georges Carré, éditeur, 1892, p. 10.

deux lumières, n'a cessé d'être visible que lorsque la petite partie ajoutée à été environ 64 fois plus faible que la première.⁶¹

Selon la détermination de Bouguer, il est donc possible de distinguer deux lumières différant de $\frac{1}{64}$ de l'intensité lumineuse. Il en déduit l'incertitude des évaluations photométriques faites par l'œil : « Je ne dois craindre qu'une erreur d'une soixantième partie dans chaque comparaison de lumière... »⁶² Il admet également une dispersion autour de cette évaluation en raison des différences physiologiques d'un observateur à un autre. Enfin, Bouguer fait état de la comparaison photométrique des lumières de différentes couleurs :

Nous ne voyons aucun autre obstacle à l'application de nos règles, si ce n'est lorsque les deux lumières qu'on veut comparer, sont de différentes couleurs. (...) La comparaison de deux lumières de différentes couleurs, de la manière dont nous la prescrivons, est principalement embarrassante dans le cas où il faudrait la faire avec plus de soin ; c'est à dire, lorsque les deux forces approchent beaucoup d'être égales. Mais il y a un point où une des deux lumières paroît certainement plus forte que l'autre, & un autre point où cette lumière paroît plus faible. Il n'y a donc qu'à prendre le milieu entre ces deux termes.⁶³

La question de la photométrie hétérochrome est donc posée et Bouguer en a le mérite même si la réponse qu'il y apporte est un peu rapide.

Conclusion

Bouguer a posé le problème de la *gradation de la lumière*. Ses recherches l'ont conduit à apporter des réponses à diverses questions de la science de son temps : notamment la comparaison photométrique des corps célestes et l'affaiblissement de la lumière à la traversée des corps diaphanes et en particulier de l'atmosphère terrestre. Conscient des limites imposées par l'œil aux évaluations photométriques, Bouguer est le premier à déterminer l'unité physiologique, c'est à dire la plus petite différence d'éclairement perceptible par la rétine. Les instruments utilisés par la photométrie jusqu'à la seconde moitié du XIX^e siècle s'inspireront des travaux de Bouguer et de ses expériences relatés dans l'Essai et dans le Traité sur la Gradation de la lumière. Dans l'histoire de l'optique, ces textes constituent deux ouvrages de référence car

61. P. Bouguer, Traité, p. 52.

62. P. Bouguer, Traité, p. 53.

63. P. Bouguer, Traité, p. 49-50.

y sont définis les premiers principes des mesures photométriques. Un siècle après, dans les mémoires qu'il consacrera à la photométrie, François Arago dira ceci :

Après les ouvrages de Bouguer et de Lambert, la science n'a plus guère à enregistrer qu'un petit nombre de déterminations numériques dues à Rumford et à Herschel. Ce n'est pas cependant qu'il ne fut évident pour tout le monde que la photométrie était encore dans son enfance.⁶⁴

Arago semble donc attribuer la gestation de cette science à Bouguer et à Lambert dont il sera question plus loin. Il faudra attendre les techniques fondées par Arago sur la polarisation de la lumière pour voir apparaître quelque nouveauté. Comme le rappelle Olivier Darrigol⁶⁵, l'expédition du Pérou ayant tenu Bouguer éloigné de France pendant de longues années, l'a certainement empêché de produire davantage pour cette partie fondamentale de l'optique. Mais indéniablement, l'Essai et le Traité ont durablement influencé l'évolution d'une nouvelle science. Il peut paraître étrange que Bouguer, qui s'est tant intéressé à la mesure de la lumière, n'ait pas davantage écrit sur sa nature intime ni sur son interaction avec la matière. Bouguer ne philosophe pas ni ne cherche une explication du *monde*. Sa physique est appliquée, sa science, celle de l'ingénieur qui doit apporter des solutions à des problèmes concrets. Là réside sans doute toute l'originalité de sa démarche et de ses méthodes.

1.2 Jean-Henri Lambert, le géomètre

Jean-Henri (Johann-Heinrich) Lambert est le second personnage clé de l'histoire de la photométrie au XVIII^e siècle. Il naît en 1728 à Mulhouse — alors cité exclave de la Confédération suisse — un an avant la publication par Bouguer de l'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière. En 1760, deux ans après la mort de Bouguer, et la même année que la publication posthume par La Caille du Traité, Lambert publie sa *Photometria sive de mensura et gradibus luminis*. Nonobstant ces coïncidences temporelles entre les vies et les carrières respectives du Breton et du Mulhousien, les manières d'aborder les questions de la photométrie chez les deux savants présentent des différences que nous allons tenter de mettre en relief.

64. François Arago, « Mémoire sur les moyens de résoudre la plupart des questions de photométrie », *Oeuvres complètes*, Tome X, Paris, Gide Éditeur, Leipzig, T.O. Weigel, 1858, p. 151.

65. Olivier Darrigol, [Dar12], p. 113.

La biographie de Lambert nous est connue par l'éloge de Johann Heinrich Samuel Formey (1711-1797), secrétaire perpétuel de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres de Berlin⁶⁶. Un article signé Picot lui est également consacré dans la *Biographie universelle ancienne et moderne* de Louis-Gabriel Michaud (1773-1858)⁶⁷. Dans son introduction à la traduction française de la *Photometria*, Michel Saillard fournit aussi les principaux éléments de la vie et de la personnalité de Jean-Henri Lambert⁶⁸.

De condition modeste, le jeune Lambert est remarqué pour ses dons intellectuels mais son père le destine au métier de tailleur. Formey raconte avec emphase comment, à force de persévérance, le garçon tailleur réussit à satisfaire son désir contrarié d'étudier et entra, par le plus grand des hasards, en contact avec l'arithmétique et la géométrie : « Alors aux foibles clartés qui l'avoient jusqu'alors guidé succéda une lumière qui ne fit plus que s'accroître. » Ayant appris la calligraphie, le jeune homme est employé comme copiste à la Chancellerie de Mulhouse. Puis, dans l'ambition d'apprendre le français, « il entre en qualité de Commis ou Teneur de livres chez un M. de la Lance de Montbéliard ». Toujours, selon Formey, pour « satisfaire sa passion pour l'étude », il obtient un emploi de secrétaire chez le professeur de droit constitutionnel Iselin, conseiller du Margrave de Bade-Dourlach. Celui-ci le recommande sur le poste d'*Instituteur* des petits fils de Monsieur Pierre de Salis, Comte du Saint Empire, à Coire, lui fournissant ainsi l'accès à une vaste bibliothèque et l'opportunité de l'étude des mathématiques et de la physique. Lambert est donc un autodidacte qui dévore les livres de sciences et qui, très vite, publie des mémoires de mathématiques et de physique reconnus par d'éminentes personnalités du monde scientifique, en particulier par Daniel Bernouilli (1700-1782). En 1753 — il n'a que vingt-cinq ans — il devient sociétaire de la Société Helvétique de Bâle. C'est le début d'une brillante carrière. À partir de cette date plusieurs ouvrages importants lui assurent la notoriété et l'estime des savants les plus renommés comme Euler avec lequel il entretient une correspondance. En 1765, il est nommé membre ordinaire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres de Berlin, poste qu'il occupera jusqu'à sa mort en 1777.

L'œuvre de Lambert est importante et éclectique. En astronomie, il étudie les propriétés des orbites des comètes dans son *Insigniores orbitae cometarum*

66. J. Formey, *Éloge de M. Lambert*, Nouveaux mémoires de l'Académie des sciences et Belles lettres de Berlin, année 1778, Berlin, 1780, p. 72-91.

67. *Biographie universelle ancienne et moderne*, tome XXIII, chez L.G. Michaud, Paris, 1819, p. 265-276.

68. Jean-Henri Lambert, *Photométrie ou de la mesure et de la gradation de la lumière, des couleurs et de l'ombre*, Traduction du latin par J.Boye, J. Couty, M. Saillard, introduction et notes par M. Saillard, L'Harmattan, Paris, 1997, p. iii-vii.

proprietas publié à Bâle en 1761. La même année — il est maintenant à Augsbourg — il livre ses conceptions sur l'Univers dans un autre ouvrage important : *Cosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues*. Il est l'auteur de plusieurs traités de mathématiques et de philosophie dont un *Novum organum*. On peut également mentionner un ouvrage sur la couleur⁶⁹ où Lambert donne la description de sa « Pyramide des couleurs peinte à la cire de Calau »⁷⁰. Dans la longue liste des publications de Lambert, deux livres majeurs sont consacrés à l'optique.

En 1759, Lambert publie *Les propriétés remarquables de la route de la lumière par les airs et en général par plusieurs milieux réfringens sphériques et concentriques*. Il consacre cet ouvrage à la première partie de l'Optique, la dioptrique. Lambert a l'ambition de traiter le problème de la réfraction de la lumière par l'atmosphère terrestre. L'application de ce problème est importante : en traversant l'atmosphère terrestre, les rayons lumineux provenant d'un astre se réfractent. En raison de la variation de la densité de l'air avec l'altitude, la trajectoire de la lumière n'est pas rectiligne. La hauteur apparente de l'astre sur l'horizon est plus grande que la hauteur réelle. Une correction est nécessaire pour évaluer la position angulaire réelle de l'astre observé. Lambert démontre les théorèmes relatifs à la réfraction de la lumière quand elle traverse une succession de milieux réfringents, sphériques et concentriques. Il applique ensuite ces propositions à la détermination des réfractions astronomiques et au calcul des corrections à apporter à la hauteur des astres. Lambert se livre aussi à des mesures géodésiques et corrige, en fonction de la réfraction terrestre, l'évaluation de la hauteur des reliefs.

Dans l'avant-propos des *Routes de la lumière* Lambert annonce son dessein de parler de l'autre partie de l'Optique, la Photométrie. Il y voit un sujet d'étude indispensable à une meilleure connaissance de la lumière :

Qui veut imaginer une théorie de la lumière, il ne lui suffira pas, de savoir qu'elle se réfléchit & se brise suivant une certaine loi : mais il lui importera, d'en pouvoir déduire la quantité de l'une & de l'autre conformément aux expériences.⁷¹

69. J. H. Lambert, *Beschreibung einer mit Calaischem Wachse ausgemalten Farben-Pyramide, wo die Mischung jeder Farbe aus weiß und drey Grundfarben angeordnet, dargelegt und derselben Berechnung und vielfacher Gebrauch gewiesen wird*, Berlin, 1772.

70. Sur les « figurations chromatiques au XVIII^e siècle, voir Aurélia Gaillard et Charlotte Guichard, « Un monde de couleurs. Représentations chromatiques au XVIII^e siècle », *Lumières*, Presses universitaires de Bordeaux, 2024/1, num. 43, p. 9-26.

71. Jean-Henri Lambert, *Les propriétés remarquables de la route de la lumière par les airs et en général par plusieurs milieux réfringens sphériques et concentriques*, Chez Nicolaas van Daalen, La Haye, 1759, p. 5.

Cette volonté de théoriser sur la lumière, qui n’anime pas Bouguer, apparaît chez Lambert dès les premières pages de sa *Photometria* :

Il manque une théorie physique de la lumière, si du moins on la désire démontrée et appuyée sur des raisonnements. Il manque les instruments permettant de mesurer la lumière. Manquent enfin les premiers principes permettant de déduire les autres.^{72, 73}

À l’époque de Lambert coexistent deux théories sur la lumière. Celle de Newton présente la lumière comme un flux de particules émanant du corps lumineux dont la masse diminue, par voie de conséquence, pendant cette émission. À l’opposé, la théorie de Huygens utilise une description que nous qualifions aujourd’hui d’*ondulatoire*. Cette dernière conception, qui n’est pas dominante à l’époque, est défendue par Euler qui assimile la propagation de la lumière dans l’éther à celle du son dans l’air⁷⁴. Là encore, selon Euler, cette propagation nécessite un support matériel, l’*ether*, milieu subtil et élastique, sensé remplir l’espace tout en étant invisible et impalpable. Si Bouguer n’évoque que très rapidement la nature de la lumière pour énoncer d’emblée sa méthode expérimentale (supra 36), Lambert fait part de sa frustration de ne pas disposer d’une description complète du phénomène lumineux, frustration néanmoins tempérée par le fait que le formalisme qu’il compte développer pourra composer avec l’une ou l’autre de ces conceptions.

Mais les déficiences dont souffre la théorie physique de la lumière sont extrêmement notables, de sorte qu’il est difficile d’éviter qu’elles ne se glissent en grande partie dans la photométrie ; malgré tout, elles seront, s’il faut avouer ce qu’il en est, beaucoup moins importantes dans ce domaine. (...) ⁷⁵

Et plus loin, il ajoute :

J’adapterai le plus possible ces démonstrations aux deux hypothèses sur la nature de la lumière, c’est à dire bien sûr celle de Newton et celle d’Euler.⁷⁶

72. Jean-Henri Lambert, *Photométrie ou de la mesure et de la gradation de la lumière, des couleurs et de l’ombre, Bâle, 1760 (Photometria par la suite)*, traduction du latin de J. Boye, J. Couty et M. Saillard, L’Harmattan, Paris 1997, §2, p. 2.

73. La pagination fournie ici et par la suite est celle de l’ouvrage original de Lambert, fournie dans la traduction de DiLaura, [DiL01].

74. Voir en particulier L. Euler, *Lettres à une princesse d’Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie*, Tome I, 1770, lettre XX, p. 79.

75. *Photometria*, §5, p. 4.

76. *Photometria*, §18, p. 12.

On rencontre, c'est sûr, dans la Photométrie un nombre non négligeable d'expériences qui peuvent très facilement s'accorder avec l'un ou l'autre des deux systèmes.⁷⁷

Lambert émet des hypothèses sur la nature de la lumière. Mais il précise que la véritable nature de la lumière n'a pas d'incidence sur la photométrie. En l'absence d'une théorie consistante sur la lumière, il va donc élaborer un formalisme complet pour sa photométrie dont il est conscient des limites que lui impose l'œil. En photométrie, les choses ne peuvent procéder que par égalisation visuelle.

Il [l'œil] n'est pas capable malgré tout, parmi les degrés de l'éclat, de distinguer une autre relation que la relation d'égalité. (...) Lorsque nous avons dit que l'œil peut juger de l'égalité de deux éclats, cela ne devra pas assurément être compris comme s'il s'agissait d'une égalité ayant une rigueur géométrique et absolue (...) En effet, il y a toujours une différence toute petite qui se soustrait à la pénétration du regard.⁷⁸

Comme un *géomètre* qu'il est, Lambert fournit d'emblée les définitions et les axiomes nécessaires à sa théorie, essai de conceptualisation qui n'apparaît pas aussi marqué chez Bouguer. Si ce dernier, pour caractériser l'intensité d'une source lumineuse telle qu'elle est perçue par l'œil se contente de parler de « force » de la lumière, l'approche de Lambert se veut beaucoup plus précise et scrupuleuse.

Il apparaît en effet aussitôt que les premières notions de Photométrie doivent être exposées plus nettement afin que ce qu'il y a de *différence entre l'éclat d'une lumière et sa force éclairante* soit à son tour distinguée par les mots et que chaque chose soit désignée par le terme qui convient.⁷⁹

Il faut surtout distinguer *l'éclat d'une lumière qui éclaire un objet de l'éclat de l'objet éclairé par elle*. C'est dans cette mesure évidemment que nous attribuons à la lumière *la force éclairante* ou *splendeur*⁸⁰. Quant à l'éclat qu'elle répand sur les objets, nous l'appellerons *éclairement*.⁸¹

77. Photometria, §19, p. 13.

78. Photometria, §29 et §30, p. 16-17.

79. Photometria, §33, p. 17.

80. Traduction proposée par J. Boye, J. Couty et M. Saillard du mot *splendor*.

81. Photometria, §36, p. 19.

Et plus loin :

Mais quelle que soit la manière dont nous imaginons la nature et les caractères physiques des rayons, si l'on considère l'effet le plus visible pour l'œil, il faudra de toute façon admettre que cet effet doit être examiné de deux façons puisqu'il faut obligatoirement distinguer la densité des rayons de leur quantité.⁸²

Lambert s'attache donc à définir avec rigueur les grandeurs fondamentales de la photométrie. Il fait la différence entre ce qu'il désigne comme la quantité des rayons, grandeur extensive qui correspond à la notion actuelle de *flux lumineux*, et la densité des rayons, grandeur intensive qu'il appelle aussi « intensité de la lumière ». Mais un certain nombre d'ambiguïtés subsistent, en particulier la confusion qui naît de l'utilisation du mot *éclairément* pour désigner l'« éclat » d'un corps qui n'est pas lumineux par lui-même. De plus, on peut s'interroger sur la nature de la « force éclairante » ou « splendeur » de la source lumineuse. De quelle notion actuelle cet attribut de *splendeur* pourrait-il être rapprochée : l'*intensité* ou la *luminance*⁸³ ?

Une fois les grandeurs fondamentales définies, ne reste plus à Lambert qu'à démontrer les lois de la photométrie, soit par l'expérience soit par les méthodes de la géométrie qu'il manie avec aisance. Ces lois sont au nombre de trois :

L'éclairément croît comme le nombre de bougies, ou de lumière, ou de points lumineux qui éclairent une feuille ou un plan qui leur fait face.⁸⁴

Il s'agit de la loi d'additivité des flux lumineux qui est admise aujourd'hui comme un principe.

Cet éclairément décroît comme le carré de la distance du corps lumineux au plan éclairé.⁸⁵

On retrouve ici la loi de l'inverse du carré de la distance déjà démontrée par Bouguer.

82. *Photometria*, §42, p. 21.

83. Voir les définitions de ces grandeurs en annexe A.

84. *Photometria*, §227, p. 105.

85. *Photometria*, §227, p. 105.

Cet éclairement varie comme le sinus de l'angle d'incidence.⁸⁶

Il s'agit de la loi de l'obliquité que Lambert énonce de façon plus précise au §53 :

Le rapport de l'éclairement perpendiculaire à l'éclairement oblique est égal au rapport de l'unité au sinus de l'angle d'incidence.^{87, 88}

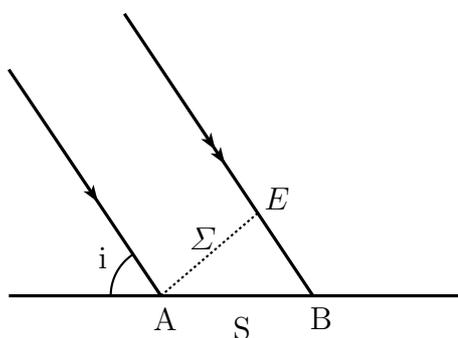


fig. 1.11 – Loi de l'obliquité. D'après J.H. Lambert, *Photometria*, fig.1, Tab.I.

La démonstration de la loi de l'obliquité, selon Lambert, se résume ainsi : ce sont les mêmes rayons que reçoivent la portion de plan AB et la portion de plan AE. La densité des rayons étant comme le nombre de rayons divisé par la surface⁸⁹, celle qui est reçue en AE est plus grande que celle reçue en AB dans le rapport inverse des surfaces. Si on appelle \mathcal{E} la densité des rayons reçue en AE et \mathcal{E}' celle reçue en AB, on trouve facilement :

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}'} = \frac{AB}{AE} = \frac{S}{\Sigma} = \frac{1}{\sin(i)} \quad (1.3)$$

Lambert ne se contente pas de l'énoncé de ces trois lois déjà connues à son époque. Il veut les rassembler dans une formule unique et y emploie les moyens des mathématiques, en particulier les développements en série. Il montre ainsi que l'éclairement η ne peut s'exprimer en fonction du nombre

86. *Photometria*, §227, p. 105.

87. *Photometria*, §53, p. 26-27.

88. Il est important de noter qu'à l'époque de Lambert l'angle d'incidence est défini comme l'angle que fait le rayon avec le plan recevant la lumière. Aujourd'hui, les angles sont mesurés par rapport à la normale à ce plan.

89. On peut supposer que la densité de rayons évoquée ici correspond à la notion actuelle d'éclairement défini comme le flux lumineux reçu par unité de surface

de bougies z , du sinus de l'angle d'incidence s et de la distance x que selon la relation suivante⁹⁰ :

$$\eta = \frac{z \cdot s}{x^2} \quad (1.4)$$

Lambert étudie également la question des sources étendues. En prenant comme source le Soleil, il définit l'angle d'émanation, angle entre le rayon et la surface émettrice et il démontre la loi de l'émission

Ainsi donc la force éclairante et l'éclairement décroîtront en fonction du sinus de l'angle d'émanation.⁹¹

Cependant il suppose que le disque solaire est d'un éclat uniforme⁹², contrairement à Bouguer qui avait évalué, à l'aide d'un héliomètre de son invention, de combien les parties du Soleil, voisines du centre sont plus lumineuses que celles du limbe.

Comme le souligne Olivier Darrigol⁹³, nombre de lois et théorèmes énoncés par Lambert sont empruntés à ses prédécesseurs, en particulier Bouguer et Euler. Ce qui est remarquable dans son œuvre est la tentative systématique de débarrasser ces lois de l'empirisme en définissant avec rigueur les grandeurs fondamentales de la photométrie et en démontrant ses théorèmes par les outils mathématiques qu'il excelle à manier.

Une autre originalité du travail de Lambert réside dans ses approches expérimentale et mathématique de la perception visuelle. Dans sa traduction de la *Photometria*, David L. DiLaura explique que Lambert avait pressenti la relation « complexe et non linéaire » entre le stimulus lumineux et l'éclat perçu par l'œil⁹⁴. L'ambition de Lambert est de rechercher la relation entre l'ouverture de la pupille, l'éclat d'une lumière et aussi sa grandeur apparente. Il inaugure par là une technique aujourd'hui davantage propre à l'optique physiologique qu'aux mathématiques, la *pupillométrie* et il insiste ici sur l'importance des données expérimentales :

Arriver à calculer l'ouverture de la pupille en fonction d'un système de mesure universel et examiner à fond sa relation avec la

90. La démonstration longue et fastidieuse occupe les paragraphes 229 à 253, 105-119 de la *Photometria*. Voir également la note de Michel Saillard pour la traduction en français de la *Photometria*, p. 423.

91. *Photometria*, §81, p. 41.

92. *Photometria*, §75, p. 38.

93. Olivier Darrigol, [Dar12], 116.

94. J. H. Lambert, traduction de DiLaura [DiL01], p. ix.

grandeur et l'intensité d'une lumière ainsi que sa façon d'être par rapport à ces éléments et cela à l'aide du calcul (...) cela n'est pas possible pour la raison que la cause du procès ciliaire est tout à fait incertaine. (...) Donc j'ai décidé d'entamer le problème de la façon suivante : mettre en avant les données fournies soit par l'expérience commune, soit par des expériences élaborées avec soin, et en déduire des principes ne s'éloignant de la réalité que de façon négligeable.⁹⁵

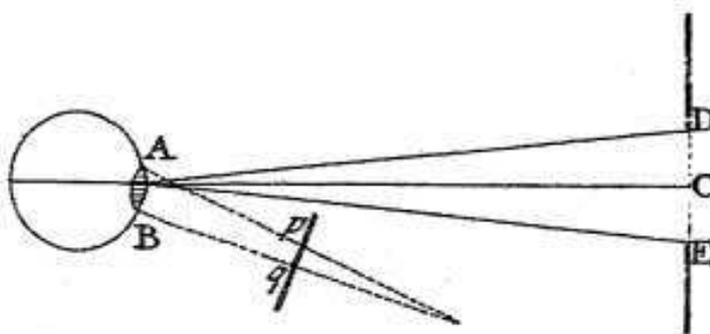


fig. 1.12 – Pupillomètre de Lambert.

L'œil observe une ouverture circulaire DE. L'image de la pupille est formée par le miroir pq. Le diamètre pq mesuré au compas sur le miroir est égal au demi diamètre de la pupille. Lambert mesure ainsi le diamètre de la pupille, pour différentes valeurs de la distance AC de l'œil à l'ouverture circulaire éclairée par un ciel pur (Voir l'expérience XXXIII du chapitre 2, partie 4 §853 de la *Photometria*). Dessin tiré de J.H. Lambert, *Photometria*, fig. LXXVII, Tab VI.

Lambert tente à partir de ce dispositif d'établir la relation entre l'éclat de la source et le diamètre de la pupille. Mais ses efforts achoppent sur le manque de données physiologiques permettant de décrire au mieux les mécanismes de la vision et il fait le constat d'impuissance suivant :

Les expériences décrites dans ce chapitre peuvent-elles apporter quelque chose ? Que ceux qui ont l'intention de se livrer à l'examen de la cause des mouvements ciliaires avec l'intelligence vigoureuse nécessaire l'examinent. Pour moi, je n'approfondirai pas davantage cette question parce que ce qui en résulte est trop particulier pour pouvoir être appliqué à un œil quelconque⁹⁶.

95. J. H. Lambert, *Photometria*.

96. *Photometria*, §863, p. 387.

La méthode de Lambert n'est donc pas purement mathématique. « *Lambert's photometrics is experimental* » selon les mots de DiLaura. Même si les expériences décrites dans la *Photometria* sont en nombre moins important que celles réalisées par Bouguer, Lambert fonde aussi sa théorie de la photométrie sur l'obtention rigoureuse de données expérimentales⁹⁷. Conscient de l'imperfection du jugement de l'expérimentateur, Lambert ébauche aussi, au chapitre 3 de la première partie, une théorie novatrice des erreurs où il introduit des éléments de calcul statistique et de calcul des probabilités⁹⁸.

Pour conclure cette étude de la photométrie au XVIII^e siècle nous dirons que si Bouguer a voulu créer un *nouvel Art*, au sens technique du terme, Lambert, lui, s'est attaché à fonder une nouvelle science : la *photométrie*. DiLaura explique d'ailleurs comment Lambert créa le mot⁹⁹. L'utilisation, dans la rédaction de leurs ouvrages, du français par le premier et du latin par le second n'est-elle pas révélatrice de leurs ambitions différentes ? Par un patient travail expérimental, Bouguer a développé les méthodes de comparaison des sources lumineuses pour apporter la solution à de nombreux problèmes posés en son temps, comme la comparaison de la lumière solaire à la lumière diffusée par la Lune. Quant à Lambert, son mérite est d'avoir construit de façon complète et détaillée, un formalisme mathématique pour cette science nouvelle. Son entreprise de conceptualisation poussée plus loin que celle de Bouguer lui permet de fournir les définitions des grandeurs fondamentales de la photométrie. Efforts méritoires donc, mais dont la portée se trouve limitée car il manque à Lambert une représentation précise de la lumière. Aujourd'hui il est admis que les faisceaux de lumière véhiculent l'énergie lumineuse et les grandeurs fondamentales de la photométrie se déduisent aisément de la notion de flux lumineux, cette grandeur étant elle-même définie comme la puissance, c'est à dire l'énergie émise pendant l'unité de temps par les sources. Lambert et Bouguer ne disposent pas de cette description précise et commode et il en résulte des ambiguïtés dans les définitions qu'ils donnent de l'*intensité*, de l'*éclat* et de l'*éclaircissement* des sources lumineuses. Il n'en demeure pas moins que les ouvrages de Bouguer et de Lambert font date dans l'histoire de la photométrie et que les méthodes développées par ces deux savants influenceront durablement cette partie de l'optique.

1.3 Thompson - Premier photomètre pratique

Au tournant du siècle naît avec Benjamin Thompson, Comte Rumford, une photométrie pratique, orientée vers les questions d'éclairagisme. L'éloge

97. DiLaura avance le chiffre de quarante expériences réalisées par Lambert.

98. Voir en particulier les §270 à §314, *Photometria*, p. 128-148.

99. J. H. Lambert, traduction de DiLaura [DiL01], p. iv.

de Georges Cuvier (1769-1832)¹⁰⁰ nous apprend comment Thompson mena une carrière militaire au service de la couronne britannique avant que l'Électeur de Bavière, Charles Théodore, ne s'attachât ses services dont il eut à se louer puisqu'il éleva le jeune officier à la dignité de comte¹⁰¹. Nanti d'importantes responsabilités, Rumford mena d'utiles réformes dans cet état du Saint Empire. Après avoir réorganisé l'armée et la police, il s'attela à l'éradication de la mendicité. C'est ainsi qu'il fonda une « maison de l'industrie »¹⁰² où furent employées les personnes dans l'incapacité de subvenir à leurs besoins. Thompson fut ainsi amené à déterminer les moyens les plus économiques d'assurer le chauffage et l'éclairage de ce vaste établissement et à comparer les performances des différents luminaires de l'époque.

Thompson décrit de façon détaillée l'instrument qu'il compte utiliser à cette fin dans deux lettres adressées à Sir Joseph Banks (1743-1820) en février 1794¹⁰³. Dans son principe, la méthode employée par Rumford reprend celle développée par Bouguer pour déterminer l'incertitude des évaluations photométriques (Supra, fig. 1.10). Un écran blanc est illuminé par les deux sources lumineuses A et B à comparer. Une tige verticale opaque CD est placée sur le chemin de la lumière des deux sources. La source A projette en A' l'ombre de la tige, ombre éclairée par la source B . De même la source B projette en B' l'ombre de la tige, ombre éclairée par la source A . En déplaçant convenablement les deux luminaires, on peut obtenir, de façon très sensible, une égalité d'apparence des deux ombres qui correspond à l'égalité d'éclairement. En appelant x l'intensité de la source A , y celle de la source B , m la distance de la première source au point P d'observation, n celle de la seconde, Rumford détermine que *l'intensité* de la première source au point P est $\frac{x}{m^2}$, que celle de la seconde est $\frac{y}{n^2}$ et il conclut que $x : y :: m^2 : n^2$. Il est ainsi possible de comparer l'intensité y de la source B à celle x de la source A prise comme référence. La méthode est parfaitement expliquée par Samuel Clegg (1781-1861) dans son traité de l'éclairage :

Si deux lumières éclairent une même surface sous une obliquité

100. Éloge de M. le Comte de Rumford, lu à la séance publique de l'Institut, le 9 janvier 1815, par M. Cuvier, secrétaire perpétuel.

101. Pour une biographie plus détaillée, consulter Georges Edward Ellis, *Memoir of Sir Benjamin Thompson, Count Rumford, with notices of his Daughter*, London, Macmillan and Company, 1875.

102. Cuvier traduit ainsi le mot *workhouse*. Ce terme représente un hospice où les indigents pouvaient trouver le gîte et le couvert en échange d'un travail. Les conditions de vie dans ce type d'établissement étaient plus dures que ne le laisse supposer l'éloge de Cuvier.

103. Benjamin Thompson, « An Account of a Method of measuring the comparative Intensities of the Light emitted by luminous Bodies. », *Phil. Trans.*, London, 1794, vol. 84, p. 67-106.

égale, et qu'on interpose, entre eux [sic] et la surface éclairée, un corps opaque, les deux ombres portées différeront en intensité, car l'ombre formée par la plus forte lumière ne sera éclairée que par la plus faible; et inversement, l'autre ombre sera éclairée par la lumière la plus intense, c'est-à-dire que l'ombre la plus foncée correspondra à la lumière la plus vive; mais, en éloignant celle-ci à une distance plus considérable, on peut rendre les ombres parfaitement égales. Une fois cette égalité obtenue, l'intensité des deux lumières sera proportionnelle au carré de la distance de chacune d'elles à la surface éclairée.¹⁰⁴

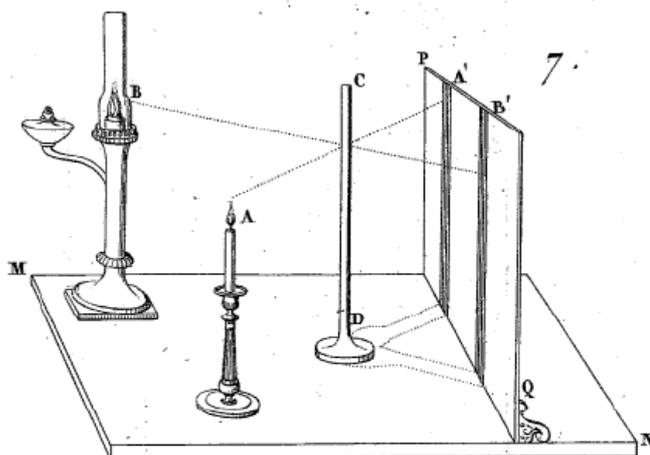


fig. 1.13 – Appareil de Rumford appelé aussi photomètre de Lambert.
Dessin tiré de Eugène Pécelet, *Traité de l'éclairage*, Malher, Paris, 1827, fig.7, pl. I.

Sur le fond, la méthode utilisée par Rumford n'apporte pas de nouveauté par rapport à celle de Bouguer. Néanmoins il y apporte des améliorations pratiques notables et réalise le premier instrument de comparaison des sources lumineuses digne d'être appelé *photomètre*. La précision de l'instrument reste cependant médiocre, selon Adrien Palaz (1863-1930), elle ne dépasse pas 10 à 15 pour cent¹⁰⁵.

L'idée neuve réside avant tout dans la définition d'une lumière *standard* pour faciliter les comparaisons et les calculs :

104. Samuel Clegg, *Traité pratique de la fabrication et de la distribution du gaz d'éclairage et de chauffage*, traduction de l'anglais par Ed. Servier, Librairie scientifique, industrielle et agricole, Lacroix et Baudry, Paris, 1860, p. 280.

105. Adrien Palaz, *Traité de Photométrie industrielle*, Paris, Georges Carré, 1892, p. 23-24.

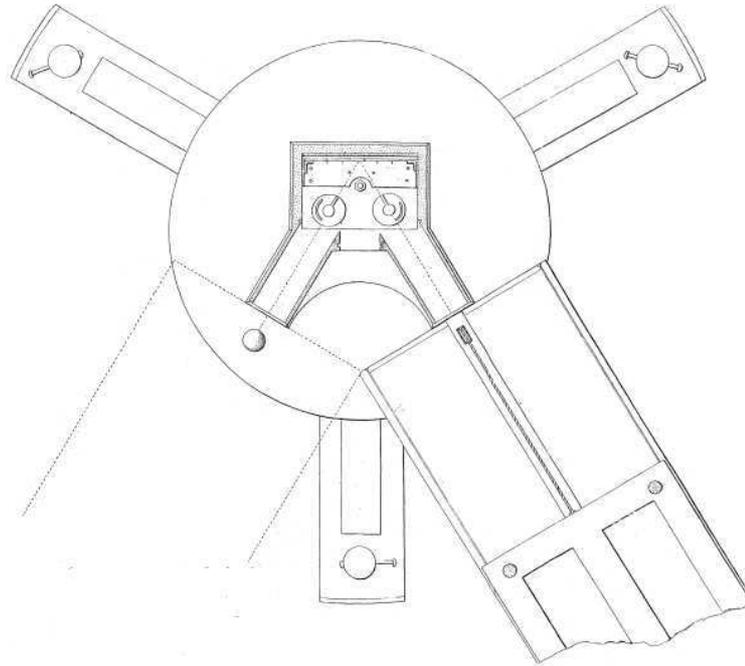


fig. 1.14 – Photomètre de Rumford, vue de dessus.

*It will greatly facilitate the calculations necessary in drawing conclusions from experiments of this kind, if some steady light of a proper degree of strength for that purpose be assumed as a standard, by which all others may be compared*¹⁰⁶.

Thompson choisit à cette fin une lampe d'Argand. Inventée par le genevois Ami (ou Aimé) Argand (1750-1803), cette lampe à huile utilise une mèche cylindrique assurant une meilleure ventilation de la flamme que la simple mèche plate traditionnelle. La combustion de l'huile est complète et la lampe ne fume pas. Considérant que la quantité de lumière émise varie comme la quantité d'huile consommée, Thompson affirme :

*If therefore, the standard lamp be so adjusted as always to consume a certain given quantity of oil in a given time, there is much reason to suppose that it may then be depended on as a just standard of light*¹⁰⁷.

On peut voir ici une première tentative de définir un « *just standard of light* », c'est à dire un étalon de lumière que Thompson utilise aussitôt. Il place cet

106. Benjamin Thompson, [TCR94], p. 81.

107. Benjamin Thompson, *ibid.*, p. 83.

étalon donnant une intensité lumineuse égale à 1, par définition, à une distance de 100 pouces de la chambre du photomètre et en déduit une intensité de $\frac{1}{100^2} = \frac{1}{10000}$ dans le champ d'observation du photomètre.

Quelques années plus tard, dans ses *Recherches sur la lumière qui se manifeste dans la combustion des substances inflammables*, publiées en français, Thompson définit même un *étalon de clarté* pratique :

Pour remplir le rôle important d'*étalon de clarté*, il a fallu une lumière très constante, et en même temps bien connue de tout le monde : j'ai trouvé ces deux qualités dans une bonne bougie. Celle que j'ai choisie est de l'espèce qu'on nomme bougie de « cinq à la livre » (...) J'ai donné à la lumière de cette bougie la valeur de 100, et je place la bougie toujours à la division de l'échelle du photomètre qui est marquée 100 lorsqu'elle est en fonction.¹⁰⁸

Dans ce dernier travail, l'ambition de Thompson n'est pas seulement pratique. Il s'agit de vérifier les hypothèses sur la nature même de la lumière et de démontrer que la lumière n'est pas un produit chimique de la combustion mais une vibration dans l'éther, analogue aux vibrations sonores dans l'air¹⁰⁹.

Mais, si on trouve, par les résultats d'expériences décisives, que la lumière répandue dans la combustion parfaite d'une même quantité de matière inflammable est *variable*, il sera impossible, ce me semble, de ne pas voir que cette lumière ne peut pas être un produit chimique de la combustion...¹¹⁰

En mesurant soigneusement les masses d'huile consommées par une lampe d'Argand, Thompson montre simplement que les différentes intensités de lumière émises par la lampe ne sont pas dans un rapport constant avec les quantités d'huile brûlées. Si ce résultat infirme l'hypothèse que la lumière serait un des produits chimiques de la combustion, il n'autorise cependant pas à préjuger la nature ondulatoire de la lumière.

Mais le travail de Thompson reste, avant tout, tourné vers les applications pratiques et animé par des considérations économiques. Muni de son photomètre, il s'attache à déterminer les performances des différents moyens d'éclairage de son temps ainsi qu'à mesurer leur consommation en fonction

108. Benjamin Thompson Comte Rumford, *Recherches sur la lumière qui se manifeste dans la combustion des substances inflammables*, Firmin Didot, Paris, 1811, p. 8-9.

109. Hypothèse défendue par Euler.

110. Benjamin Thompson, *ibid.*, p. 6.

du combustible utilisé (suif, stéarine, cire d'abeille, huile de colza, huile de lin et même huile d'olive)¹¹¹. Il travaille également à la conception et à la réalisation de nouveaux luminaires domestiques. Il est ainsi sans doute l'un des premiers à s'intéresser aux questions d'éclairagisme. Comme le souligne DiLaura :

*Thompson's work is the first development in what can be regarded as industrial photometrics — the measurement and prediction of light for commercial, industrial and architectural uses.*¹¹²

1.4 Conclusion

L'héritage laissé aux photomètres du XIX^e siècle par ces trois personnalités apparaît substantiel. Bouguer a clairement défini les méthodes de gradation de la lumière et les pratiques pour en mesurer la force. Son traité fournit les réponses aux multiples problèmes de son temps, comme « combien la lumière du Soleil est plus forte que celle de la pleine Lune ». Bouguer s'attaque aussi à des questions qui restent des préoccupations actuelles, comme lorsqu'il s'intéresse à la rugosité de la surface des objets qu'ils soient terrestres ou célestes. Il déploie ici un sens physique affirmé en concevant un modèle de réflexion de la lumière, par les multiples faces microscopiques, déterminées par les irrégularités de la surface rugueuse.

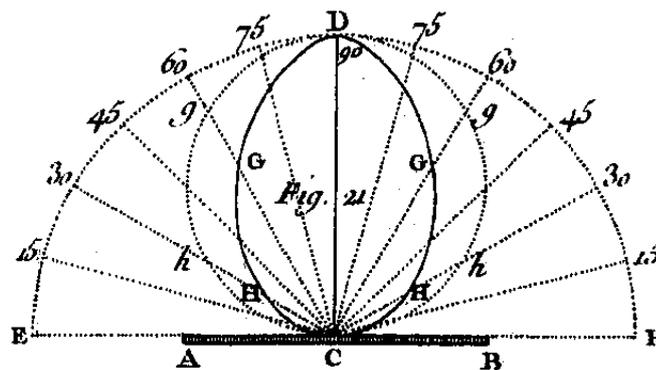


fig. 1.15 – Numératrice des aspérités, Tiré de P. Bouguer, *Traité*, Planche III, Fig. 21.

Il traite ainsi, dans le livre II « De l'expression des petites aspérités par les ordonnées d'une ligne courbe »¹¹³ qu'il appelle « numératrice des aspérités »

111. Benjamin Thompson, [TCR94], p. 101-104.

112. David L. DiLaura, Introduction à la Photometria de J.H. Lambert, [DiL01], p. clxxiv.

113. P. Bouguer, *Traité*, p. 169.

et en déduit une méthode astucieuse pour représenter la rugosité d'un objet. Cette courbe qui représente l'intensité lumineuse diffusée sous les différentes directions n'est qu'une forme de « l'indicatrice de diffusion » de la surface sur laquelle se réfléchit la lumière¹¹⁴. Bouguer a compris la signification particulière du cas où la numératrice des aspérités est un cercle et qui correspond à ce qui sera appelée plus tard une « surface lambertienne ». La lecture de Bouguer est donc féconde par les nouveautés qu'elle apporte.

Lambert, quant à lui, s'est attaché à définir précisément les grandeurs de la photométrie, là où Bouguer se contente des termes « force » et « quantité » de lumière. Mais la variabilité des termes introduits par Lambert : « force éclairante » ou « splendeur », « éclat » qui est soit celui de la lumière, soit celui perçu par l'œil, « éclairement », ne facilitent pas toujours la lecture du Mulhousien. Ses idées sur la photométrie, exprimées selon les formulations d'un mathématicien et publiées en latin, resteront longtemps méconnues, sans doute pour ces raisons. Mais en géomètre accompli, Lambert a su définir le cadre complet d'une photométrie géométrique permettant les calculs de l'émission des sources lumineuses et des éclairements reçus dans un bon nombre de problèmes.

Enfin, Thompson a compris l'importance économique de l'éclairagisme. Ses initiatives sur cette question marquent le début d'une photométrie pratique qui s'attache à la mesure des « pouvoirs éclairants » des luminaires et des combustibles qu'ils consomment. Il sera intéressant de se pencher sur l'investissement, au siècle suivant, de ces méthodes par une photométrie industrielle qui s'affirme dès le premier XIX^e siècle, à la demande des acteurs de l'industrie du gaz.

114. Voir H. Bouasse, *Optique et photométries dites géométriques*, Paris, Delagrave, 1937, p. 539-541.

Chapitre 2

Des sciences en maturation

Le XIX^e siècle voit *l'édification d'une science du phénomène lumineux* selon l'expression d'André Chappert. C'est ainsi que cet auteur décrit les progrès réalisés par l'optique :

(...) à partir des premières années du XIX^e siècle, le champ de l'optique a bénéficié d'un élargissement et d'une organisation qui ont fait entrer celle-ci dans un nouveau chapitre de son histoire, dont la cohésion s'exprime par la constitution d'un véritable corps de phénomènes, chacun acquérant son identité et son importance spécifique¹.

Mais cette cohésion s'exprime-t-elle de façon si évidente dans le développement de la photométrie ? Il convient d'examiner comment la photométrie va faire sa place dans le champ de l'optique alors qu'elle occupe une position marginale à côté de l'optique géométrique et de l'optique physique naissante, développée par Augustin Fresnel. Il faudra notamment étudier comment se forme le corpus de ses notions et de ses lois. La question d'une cohérence entre une définition théorique de l'intensité lumineuse, issue directement de la mécanique, et une définition expérimentale, laissée à l'appréciation des sens de l'observateur mérite d'être posée. Certains physiciens semblent se satisfaire du hiatus entre ces deux définitions, ainsi Éleuthère Mascart (1837-1908) qui, à la fin du siècle, présume que l'intensité de la sensation lumineuse se déduit du phénomène physique par une simple relation de proportionnalité :

Il est à présumer que l'action physiologique produite sur l'œil, au moins pour des sources de même période, est à chaque instant proportionnelle à la force vive du mouvement vibratoire ou au

1. André Chappert, *L'édification au XIX^e siècle d'une science du phénomène lumineux*, Paris, Librairie philosophique J. Vrin, 2004, p. 9.

carré de la vitesse. (...) La force vive moyenne, ou l'intensité de la lumière est proportionnelle au carré u^2 de la vitesse pendant une période.²

La définition de l'intensité de la lumière et la question de sa mesure va donc occuper tout le siècle. Ce chapitre s'intéresse donc à la construction des savoirs des photomètres, dans le premier XIX^e siècle, sur la période qui s'étend de la République directoriale jusqu'aux environs de 1830, période, en France, particulièrement féconde et prestigieuse pour les savants.

La première section 2.1 s'intéresse à la formation d'une jeunesse scientifique dans de nouveaux établissements que l'on dirait avoir été spécialement conçus pour elle. À côté de ces institutions qui forment les cadres et ingénieurs de l'État, cette jeunesse peut aussi se rassembler autour de personnalités de premier plan. Parmi ces cercles scientifiques, la Société d'Arcueil, autour de Laplace et de Berthollet mérite une attention particulière car elle fédère plusieurs savants investis dans le sujet de l'optique et de la photométrie.

Il faut ainsi s'intéresser (section 2.2) aux travaux de l'un de ces jeunes scientifiques, Jacques-Étienne Bérard (1789-1869). Ce dernier montre que le rayonnement invisible, au-delà de l'extrémité rouge du spectre, possède des propriétés identiques (double réfraction, polarisation) à celles de la lumière visible.

Les opinions sur la nature de la lumière (section 2.3) se partagent entre la conception corpusculaire (théorie de l'émission de Newton) et la conception ondulatoire (Huygens, Thomas Young (1773-1829), Fresnel...). Les principes énoncés par Bouguer et la notion d'intensité lumineuse peuvent s'interpréter selon l'une ou l'autre de ces théories.

Les pratiques de la photométrie sont étudiées sur un premier problème concret qui intéresse directement les pouvoirs publics : l'éclairage des côtes de France (section 2.4). Si les acteurs — Augustin Fresnel et François Arago — sont bien connus, les méthodes utilisées pour déterminer la portée des phares et leur classement le sont moins. Un second problème est la mesure de la transparence de l'atmosphère (section 2.5), sa diaphanéité, révélateur du « mauvais air » qui nuit à la santé des populations. Mais l'instrumentation photométrique n'a guère progressé depuis Bouguer, voire même certaines solutions proposées, aussi ingénieuses soient-elles n'en sont pas moins hasardeuses sur les résultats !

En 1808, Étienne-Louis Malus découvre la rupture de la symétrie de révolution des rayons lumineux par suite d'une réflexion vitreuse : ce phénomène

2. Éleuthère Mascart, *Traité d'optique*, tome 1, Paris, Gauthier-Villars, 1889, p. 202.

s'appellera « polarisation de la lumière ». L'abondante moisson de découvertes (polarisation rotatoire par Biot, polarisation chromatique par Arago) qui en résulte entraîne d'importantes innovations en optique instrumentale. La section 2.6 évoque la prospérité de ces travaux dont profite l'instrumentation photométrique avec, en particulier, la mise au point par Arago de la lunette polariscopique.

Avec ce type d'instrument, Arago démontre la nature gazeuse de la photosphère solaire, inaugurant par là une nouvelle branche de la science : l'astrophysique. Les méthodes développées par Arago en photométrie astronomique, quand il était Directeur des observations à l'Observatoire de Paris, sont étudiées dans la dernière section (section 2.7) de ce chapitre.

Il faut d'abord rappeler le contexte de la maturation de la photométrie entre physique mathématique et physique appliquée, dans une époque qui débute en France par la Révolution, des bouleversements politiques et une réorganisation des institutions scientifiques. L'histoire de cette réorganisation est bien renseignée et son historiographie a bénéficié de nombreux travaux importants comme ceux de Robert Fox³, de Jean-Luc Chappey⁴, Jean Dhombres et Nicole Dhombres⁵. Il s'agit ici d'évoquer le nouveau cadre institutionnel où vont évoluer les acteurs impliqués dans la maturation d'une photométrie amenée à répondre aux demandes des pouvoirs publics.

2.1 Nouvelles institutions pour une jeunesse scientifique

Le respect dont bénéficie le monde savant pendant la période révolutionnaire n'empêche pas la Convention nationale de prononcer, le 8 août 1793, la dissolution de toutes les académies « ci devant royales », décret frappant également l'Académie des sciences. On se souvient du cuisant « La République n'a pas besoin de savants » lancé par le tribunal révolutionnaire à Antoine Lavoisier (1743-1794) demandant un sursis pour achever une ultime expérience, avant la montée à l'échafaud⁶. Le siècle des Lumières s'achève donc en France par la dispersion des savants, quand ils n'ont pas subi le même sort funeste qu'un Lavoisier, un Condorcet ou un Bailly. Au mois de septembre, ce sont les universités, les facultés et les collèges qui sont supprimés. Plusieurs

3. Robert Fox, Georges Weisz, Hugh Richard Slotten (dir.), [FWS20], p. 192-216.

4. Jean-Luc Chappey, [Cha20].

5. Jean Dhombres et Nicole Dhombres, [DD89].

6. Sur l'exécution et la réhabilitation de Lavoisier, voir Chappey, [Cha20], p. 37-41.

membres de la « première classe » de l'Académie⁷ sont accueillis par la Société philomathique de Paris : fondée en décembre 1788 par six jeunes savants amateurs, en dehors de tout cadre institutionnel, cette compagnie n'apparaît pas suspecte aux yeux de la Convention montagnarde.⁸ Les naturalistes, quant à eux trouvent refuge au *Muséum national d'histoire naturelle* que la Convention vient, fort à propos, de créer. Les journées du 8 au 10 thermidor de l'an II⁹ mettent fin au régime de *la Terreur* et le 22 août 1795, deux années après la dispersion des académies, la Convention peut faire inscrire dans la Constitution : « Il y a, pour toute la République, un Institut national, chargé de recueillir les découvertes, de perfectionner les arts et les sciences. » Les scientifiques peuvent derechef se rassembler au sein de la « première classe » de l'Institut, dite de « Sciences physiques et mathématiques », regroupant ce qu'il sera coutume d'appeler les « sciences exactes ». C'est un Institut élargi par rapport à l'ensemble des défunctes académies royales : entre la première classe et la troisième classe de « littérature et beaux arts » est instituée une classe supplémentaire ainsi nommée : « sciences morales et politiques ».

Mais la Convention thermidorienne ne se contente pas de réinstaller les scientifiques dans leur assemblée, elle met en place une *politique publique* en faveur de l'enseignement, de la recherche scientifique mais aussi, selon la terminologie actuelle, de l'enseignement professionnel. La République a besoin d'artisans et d'ouvriers en nombre et bien formés. Le rapport soumis à la Convention nationale, le 8 vendémiaire de l'an III, par Henri Jean-Baptiste Grégoire (dit l'abbé Grégoire, 1750-1831), « sur l'établissement d'un Conservatoire des arts et métiers » contient ces mots fameux :

Ne dites pas que, pour faire fleurir les arts, il suffit d'avoir brisé leurs entraves et de les avoir arrachés à l'avidité d'un fisc dévorant ; il faut éclairer l'ignorance qui ne connoît pas, et la pauvreté qui n'a pas le moyen de connoître : et n'est-ce pas une belle aumône à faire à l'indigent, à l'ignorance, que de leur fournir le mo-

7. L'ordonnance royale du 23 avril 1785 avait modifié la constitution de l'Académie qui fut alors divisée en deux « classes » : la première ou « classe de mathématiques » comportait quatre sections : géométrie, mécanique, astronomie et physique générale ; la seconde ou « classe des sciences physiques » était formée des sections suivantes : anatomie, chimie et métallurgie, botanique et agriculture, minéralogie et histoire naturelle. Lire à ce sujet *Le premier siècle de l'Institut de France*, Le comte de Fanqueville, Paris, Rothschild, 1895, p. 13.

8. Sur la Société philomathique de Paris, consulter A. Thomas, *La société philomathique de Paris et deux siècles d'histoire de la science en France : Colloque du bicentenaire de la société philomathique de Paris*, Paris, PUF, 1992.

9. 26 au 28 juillet 1794.

dèle d'outils les plus propres à seconder les travaux qui assurent leur subsistance.¹⁰

Mais le lyrisme de Grégoire ne cache pas l'enjeu économique, largement souligné par l'évêque constitutionnel dans son rapport : il s'agit de limiter les importations de produits manufacturés en les fabriquant dans le pays avec une main d'œuvre hautement qualifiée et de travailler ainsi à l'indépendance économique d'une jeune république qui ne saurait subir une sujétion économique à l'égard des puissances monarchiques. Encourager l'agriculture et l'industrie par la mise en valeur des productions nationales devient une mission que s'assigne le Directoire, mission confiée au ministre de l'intérieur, Nicolas François de Neufchâteau (1750-1828). Ce dernier prend l'initiative d'organiser en l'an VI (1798) la première Exposition publique des produits de l'industrie française. Cette manifestation qui recueille un grand succès rassemble pour trois jours, au Champ de Mars, 110 exposants. Elle inaugure une série d'autres expositions, qui s'échelonnent pendant tout le premier XIX^e siècle avec un nombre toujours plus grand d'exposants exclusivement français (ils seront 5494 en 1849)¹¹. À l'occasion de l'exposition de 1806, son organisateur Jean-Baptiste de Nompère de Champagny (1er duc de Cadore, 1756-1834) dresse un état de l'industrie nationale et en particulier parisienne :

(...) ses produits chimiques, ses instruments d'optique, de physique et de mathématiques, ne sont pas moins estimés ; (...) C'est aussi en son sein [Paris] que se fait la presque généralité des découvertes. On doit un pareil résultat à la facilité qu'ont les artistes de communiquer avec les savans, qui les aident volontiers de leurs conseils ; au conservatoire des arts et métiers, qui, en offrant un point de départ pour les recherches, leur évite des tâtonnemens longs et inutiles ; et enfin à d'autres avantages qui ne peuvent se trouver que dans une ville où il y a de nombreux établissemens d'arts et de sciences.

Les notices des objets envoyés à l'exposition présentent une sorte de statistique industrielle de la France.¹²

10. Henri Jean-Baptiste Grégoire, *Convention nationale. Instruction publique. Rapport sur l'établissement d'un Conservatoire des arts et métiers. Séance du 8 vendémiaire, l'an III de la République une et indivisible. Imprimé par ordre de la Convention nationale*, Paris, Imprimerie Nationale, 1794, p. 9.

11. Christiane Douyère-Demeulenaère, *Expositions publiques des produits de l'industrie française avant 1850, répertoire méthodique*, Centre historique des archives nationales, 2005.

12. Jean-Baptiste de Nompère de Champagny, *Notices sur les objets envoyés à l'exposition des produits de l'industrie française*, Paris, Imprimerie impériale, 1806, p. 14-15.

Champagny semble se féliciter de la création d'un complexe scientifico-industriel où les « artistes » — comprendre ici les fabricants d'instruments de précision ou les hommes de l'art — en pointe travaillent main dans la main avec les savants pour développer, selon les termes actuels, « une industrie de haute technologie ». Mais pour fonctionner, ce système a aussi besoin d'ingénieurs. Force est aussi de créer, en remplacement des anciennes facultés mais aussi des anciennes écoles royales, comme l'École royale du génie de Mézières (fondée en 1748) ou l'École royale des ponts et chaussées (créée en 1747), les nouvelles écoles à même de former les cadres de la Nation. À l'instigation des membres les plus éclairées du *Comité de l'instruction publique* sont ainsi créées les *écoles de santé* qui formeront les officiers de santé, l'École centrale des travaux publics, la future École polytechnique, d'où sortiront les ingénieurs de l'État, l'École normale dite *de l'an III* pour inculquer « aux citoyens déjà instruits dans les sciences utiles » l'art d'enseigner.

La rénovation des savoirs va donc de pair avec une professionnalisation de ceux amenés à les détenir et à les diffuser et qui, à l'avenir, opéreront dans un nouveau cadre institutionnel. Ainsi en advient-il des astronomes de l'Observatoire que la Convention place sous la tutelle d'un nouvel organisme, le *Bureau des longitudes*. L'importance stratégique de l'établissement créé à l'instigation de Joseph Lakanal (1762-1845) et de l'abbé Grégoire, est exprimée dans le rapport que ce dernier présente à la Convention, le 7 messidor an III. Pour étouffer la « tyrannie britannique » (sic), il faut lui disputer la maîtrise des mers, ambition qui suppose la sûreté de la navigation par la détermination précise de la *longitude* en mer. La composition du Bureau des longitudes révèle la capacité du régime à mobiliser tout ce que la jeune république compte de savants et d'*artistes* — la présence du fabricant d'instruments Noël-Simon Caroché¹³ (1744-1813) au sein du bureau est particulièrement évocatrice — pour mener la mission avec une redoutable efficacité. Muni d'un service de calcul, doté des meilleurs instruments issus d'ateliers maîtrisant les technologies les plus avancées¹⁴, recrutant ses propres chercheurs par cooptation, on peut dire que le Bureau des longitudes a déjà tout, à l'époque, d'un grand laboratoire de recherche, sous tutelle de l'État¹⁵. Ce n'est pas trop s'avancer de dire que le système de cooptation des membres du Bureau et des élèves astronomes favorisera la création de réseaux, tels qu'ils existent aujourd'hui, entre les viviers d'ingénieurs issus des écoles de *l'an III*

13. Ou « Caroché », selon les orthographes.

14. En particulier la fabrication des objectifs achromatiques et des miroirs de platine.

15. Sur l'histoire du Bureau des longitudes, en particulier au XIX^e siècle, voir, sous la direction de Martina Schiavon et Laurent Rollet, *Pour une histoire du Bureau des longitudes (1795-1932)*, collection « Histoire des institutions scientifiques », Nancy, Presses universitaires de Nancy/Éditions universitaires de Lorraine, 2017.

et les grands organismes chargés d'accroître la puissance scientifique et économique de la jeune république. Le cas de François Arago, polytechnicien, nommé en 1805 — à seulement dix-neuf ans — Secrétaire bibliothécaire du Bureau des longitudes et qui deviendra rédacteur des *Annales de chimie et de physique* au côté de Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850), dont le passage à l'École polytechnique (promotion 1797) précède de peu celui d'Arago (promotion 1803) apparaît digne d'intérêt. Cette ascension rapide, due aux capacités intellectuelles du jeune ingénieur montre que tout est prêt, à la naissance du siècle, pour agréger cette compagnie de scientifiques de haut niveau que la République de l'an III appelait de ses vœux.

Au tournant du siècle, physiciens et chimistes ont considérablement élargi leur champ d'investigation. Mieux équipés techniquement, ils peuvent bénéficier des instruments sortis d'ateliers hautement qualifiés (Dollond en Angleterre, Caroché, Fortin, Lenoir, Lerebourg en France) et amasser quantité d'observations avec une précision inaccessible jusqu'alors ; mieux organisés, moins isolés, ils ont multiplié échanges et communications au sein de sociétés savantes. Pour extraire des lois de cette abondance de faits, ils ont conçu de nouvelles façons de penser, développé un vocabulaire et des formalismes débarrassés des vieilles philosophies. S'est ainsi rassemblée, en cette époque charnière, une solide communauté scientifique, dont la réalité ne peut être mieux affirmée que par Lavoisier lui-même :

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 la Place, de M. Monge, & 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.¹⁶

Mieux armés mathématiquement aussi, les savants apportent déjà des solutions à certaines des grandes questions de la physique et cette dernière est devenue mathématique. En France, l'école de physique mathématique est menée par l'impressionnante et respectée figure de Pierre Simon de Laplace. L'auteur de la *Mécanique céleste* travaille entouré de jeunes chercheurs : François Arago, Jean-Baptiste Biot, Pierre Louis Dulong (1785-1838), Étienne Louis Malus, Siméon Denis Poisson. Réunis au sein de la Société d'Arcueil, cercle scientifique fondé par Laplace et le chimiste Berthollet, ces savants brillants

16. Antoine de Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, Paris, Cuchet, 1789, p. xxviii-xxix.

exercer une grande influence sur la science française¹⁷. Ils défendent une théorie *mécaniste* du monde, inspirée de la mécanique céleste. Selon cette doctrine, la matière est formée d'espaces vides, éventuellement remplis d'un *éther* subtil et de parties élémentaires sur lesquelles s'exercent des forces centrales, formellement identiques à la force gravitationnelle. Quant à la lumière, sa description inspirée de l'Optique de Newton en fait un flux de corpuscules soumis également, de la part des milieux rencontrés, à des systèmes de forces tantôt attractives, tantôt répulsives¹⁸. Ces idées s'opposent à la doctrine *dynamique* (ou *dynamiste*) en vogue en Allemagne. Issue des idées d'Emmanuel Kant (1724-1804), cette dernière explique la diversité de la matière à partir du conflit de forces primitives, attractives et répulsives, propres à la matière. En dépit d'incontestables succès, le système unificateur laplacien ne fait pas l'unanimité car de nombreux phénomènes semblent échapper à sa modélisation du monde. Les trois premières décennies du siècle voient ainsi l'émergence d'une science de la chaleur, en particulier avec les travaux de Joseph Fourier (1768-1830) qui résout le problème de sa propagation et ceux de Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) qui mettent en évidence l'équivalence de la force mécanique et de la chaleur. De même, l'électromagnétisme, science jeune, atteint ses lettres de noblesse en unifiant dans une même théorie les phénomènes magnétiques et électriques par l'invention des *courants ampériens*. Pourtant, dans ces années fastes, les jeunes disciplines ne savent pas exprimer clairement le concept d'énergie et ses transformations¹⁹. Elles n'ont pas encore mis en forme la notion de *champ* ni envisagé sa propagation. Démunies des outils modernes aujourd'hui familiers, elles se voient contraintes à solliciter des créations aux propriétés étranges. Chacune des quatre grandes familles de phénomènes connus à l'époque : la chaleur, la lumière, le magnétisme et l'électricité, se voit attribuer son *fluide impondérable*, convoqué pour justifier la propagation ou les actions à distance. Voici comment le *Manuel complet de physique* de Bailly²⁰ décrit ces concepts :

On suppose donc que ces fluides sont éminemment élastiques, composés de molécules d'une ténuité et d'une subtilité pour ainsi

17. Sur l'histoire de la Société d'Arcueil, voir Maurice Crowland, [Cro67]

18. Isaac Newton, *Traité d'optique*, traduction de Coste, Paris, Montalant, 1722.

19. Voir Roger Ballian, *Physique fondamentale et énergétique : les multiples visages de l'énergie*, Cours donné à l'école d'été de physique, Caen, 27-30 août 2001. Voir également Bernard Pourprix, Jacqueline Lubet, *L'aube de la physique de l'énergie, Helmholtz, rénovateur de la dynamique*, Paris, Vuibert, 2004.

20. Il s'agit ici de Charles François Bailly de Merlieux (1800-1862), éditeur et vulgarisateur scientifique, qui ne doit pas être confondu avec l'astronome Jean Sylvain Bailly (1736-1793)

dire infinie ; qu'en conséquence ils ne peuvent opposer aucune résistance appréciable à la marche des corps célestes ; et, au contraire, peuvent pénétrer la plupart des corps avec la plus grande facilité. De là ces fluides ont été nommés incoercibles, discrets, éthérés. Enfin, on les a souvent appelés impondérables, parce qu'on n'a pas encore pu les peser.²¹

2.2 De part et d'autre du spectre visible

Dans les premières années du siècle, les expériences menées sur la lumière solaire montrent l'existence, à côté des rayons *colorés*, d'un rayonnement *calorifique* et d'un rayonnement *chimique*. Découverts par William Herschel (1738-1822), les rayons calorifiques deviennent le sujet d'intenses recherches. Le but poursuivi par Herschel est explicitement exprimé dans le titre de sa publication : il s'agit de savoir si les rayons lumineux et les rayons calorifiques sont de même nature²². Une optique de la chaleur rayonnante, vue comme la « lumière obscure », s'élabore à partir des expériences de réflexion et de réfraction, en particulier celles de Jacques Étienne Bérard. La biographie consacrée à ce jeune savant devenu député, dans le *Dictionnaire des parlementaires français* d'Ernest Adolphe Robert (1833-1899) est révélatrice du mode de cooptation au sein de la Société d'Arcueil. Robert écrit de Bérard ceci : « [il] fit de bonnes études classiques et médicales et entra, pour se consacrer spécialement à la chimie, dans le laboratoire d'Arcueil, où il resta huit ans, sous la direction du célèbre Berthollet. »²³ Le père de Bérard, lui-même fabricant de produits chimiques avait eu l'occasion de travailler avec Jean-Antoine Chaptal (1756-1832). En 1813, Bérard partage avec François-Étienne Delaroche (1781-1813) le prix de physique de l'Institut pour le « Mémoire sur la chaleur spécifique des différents gaz »²⁴ Bérard peut profiter, avec d'autres jeunes physiciens comme Malus, du laboratoire installé par Berthollet dans sa maison d'Arcueil. Bérard a l'idée de placer sur le chemin des rayons solaires un prisme taillé dans un cristal de *spath*, connu pour provoquer la *double réfraction* des rayons lumineux. En constatant l'élévation de tempé-

21. C. Bailly, *Nouveau manuel complet de physique*, Paris, Librairie encyclopédique de Roret, 1840, p. 201.

22. William Herschel, « Experiments on the solar, and on the terrestrial Rays that occasion Heat ; with a comparative View of the Laws to which Light and Heat, or rather the Rays wich occasion them, are subject, in order to determine wether they are the same or different. », *Phil. Trans.*, London, 1800, vol. 90, p. 293-326.

23. Adolphe Robert, Gaston Cougny, *Dictionnaire des parlementaires français*, Paris, Bourloton, 1889, p. 260.

24. J. E. Bérard, F. Delaroche, « Mémoire sur la chaleur spécifique des différents gaz », *Annales de chimie*, tome 85, 1813, p. 72-111, p. 113-183.

rature au voisinage de l'extrémité rouge des deux spectres obtenus, Bérard vérifie que le phénomène de double réfraction n'est pas réservé qu'aux seuls rayons visibles, mais qu'il affecte également les rayons invisibles au-delà de l'extrémité rouge du spectre. Inspiré par les travaux récents de Malus sur la polarisation de la lumière par réflexion, il soumet les rayons invisibles jouxtant l'extrémité rouge du spectre prismatique à une double réflexion vitreuse et il constate la polarisation de la lumière ainsi produite²⁵. Il conclut : « Le calorique rayonnant peut donc, comme la lumière, être polarisé. »²⁶

Même, les physiciens s'intéressent à l'autre bord du spectre. Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) semble être le premier à concevoir que la lumière contient des rayons invisibles, susceptibles d'exercer des actions chimiques. En plaçant à la lumière un papier imbibé de muriate d'argent²⁷, il constate que le noircissement du papier se produit, et de façon beaucoup plus rapide, dans la partie obscure du spectre, au-delà du violet²⁸. Soumettant ensuite le muriate d'argent légèrement noirci à la lumière, il s'aperçoit que la couleur blanche d'origine est restaurée au-delà de la partie rouge du spectre. Ritter en conclut que la lumière solaire est accompagnée de deux rayonnements invisibles, l'un jouxtant le rouge et ayant un effet « oxygenans », l'autre jouxtant la région violette du spectre, favorisant la « désoxydation ». Il appelle rayons « desoxigenans » ce dernier rayonnement. William Hyde Wollaston (1766-1828) complète l'étude de Ritter en faisant agir les rayons au-delà du violet sur la gomme de *gaiac*. Il interprète le changement de couleur opéré sur le *guaiacum* plutôt comme une oxydation et suggère d'appeler « rayons chimiques » les rayons les plus réfrangibles, au-delà de la partie violette de spectre²⁹. À la suite de Ritter et de Wollaston, Bérard étudie de façon systématique les propriétés des rayons chimiques et découvre qu'ils peuvent être polarisés comme la lumière blanche, lorsqu'ils sont réfléchis par une surface de verre, sous un angle à « très-peu-près » identique que pour la lumière blanche³⁰. Ces importants travaux conduisent les physiciens à penser

25. Bérard entreprit ce travail sur les rayons calorifiques en collaboration avec Malus dans le laboratoire que Berthollet avait installé dans sa maison d'Arcueil. Après la mort prématurée de Malus, Bérard poursuivit seul le travail entrepris.

26. Étienne Bérard, « Mémoire sur les propriétés des différentes espèces de rayons qu'on peut séparer au moyen du prisme de la lumière solaire », *Mémoires de physique et de chimie de la Société d'Arcueil*, tome III, Paris, chez Mme Vve H. Perronneau, 1817, p. 28.

27. L'acide *muriatique* est le nom ancien de l'acide chlorhydrique. Le *muriate* d'argent est le sel de cet acide, c'est à dire le chlorure d'argent.

28. J.W. Ritter, « Experiments on light », *Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts (Nicholson's Journal)*, London, W. Stratford, 1804, vol. VIII, p. 214-216.

29. W.H. Wollaston, « On certain Chemical Effects of Light », *Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts*, London, W. Stratford, 1804, vol. VIII, p. 293-297.

30. E. Bérard, [Bér17], p. 41.

la lumière solaire comme un ensemble composite de trois sortes de rayons : calorifiques, « colorifiques » et chimiques. Pour autant, les physiciens restent prudents et regardent plus les rayons calorifiques et chimiques comme des accompagnateurs de la lumière que comme des variations d'un même principe lumineux. Dans leur rapport sur le travail de Bérard, Berthollet, Chaptal et Biot rendent compte de la position de Bérard :

Il n'a présenté les propriétés physiques des rayons que comme des résultats dont il s'est abstenu de chercher la cause dans des hypothèses, et il s'est toujours renfermé dans des termes assez généraux pour qu'ils fussent également applicables, soit que les propriétés dont il s'agit appartiennent à des principes de nature réellement différente et qui seraient combinés avec la lumière, soit qu'elles résultent simplement des différences originelles qui existent entre les différentes molécules d'un même principe qui, selon les diverses circonstances de masse ou de vitesse, ou de ces deux qualités réunies, deviendraient capables de produire les combinaisons chimiques, la vision et la chaleur.³¹

Pourtant, ces mêmes rapporteurs vont plus loin que Bérard et évoquent en conclusion l'hypothèse, qui est sans doute dans beaucoup d'esprits, de l'unité du phénomène lumineux :

(...) concevons simplement, conformément aux phénomènes, que la lumière est composée d'une infinité de rayons inégalement réfrangibles et par conséquent inégalement altérables par les corps, ce qui suppose des différences originelles dans leurs masses, leurs vitesses ou leurs affinités. (...) En effet tous les rayons qui reproduisent les trois ordres de phénomènes sont de la lumière.

L'idée d'unifier le spectre à partir de sa partie colorée et de ses extrémités invisibles se propage donc peu à peu.

2.3 Intensité lumineuse et force vive

À la fin du siècle précédent, en dépit des efforts de Lambert, il n'a pas été possible de déduire les lois de la photométrie, comme la loi de Bouguer, d'une théorie de la lumière qui manque encore de consistance. La grandeur

31. C.L. Berthollet, J.A. Chaptal, J.B. Biot, « Rapport sur le Mémoire de M. Berard concernant les Propriétés chimiques des divers rayons qui composent la lumière solaire », *Procès-verbaux de l'Académie des sciences*, tome V, 1812-1815, p. 146-149.

photométrique fondamentale n'a pas été clairement définie. La photométrie en reste toujours au stade phénoménologique et applicatif. Dans le siècle naissant, l'*optique physique*, qui cherche l'explication des lois de l'optique par une théorie de la lumière, va cependant, en suivant deux approches différentes, résoudre certaines questions simples, relatives à la mesure de la lumière. Les physiciens sont alors partagés entre les hypothèses de « l'émission » ou des « ondulations » pour expliquer la propagation de la lumière, mais aussi celles des autres phénomènes. Le dilemme est résumé ainsi sous la plume de Bailly :

La transmission de la chaleur, de la lumière, de l'électricité, du magnétisme, et par suite tous les effets qui en sont une dépendance, sont-ils produits par une véritable émission de particules de la part du corps chaud, lumineux, électrique ou magnétique, ou bien sont ils le résultat de différens mouvemens vibratoires imprimés par ces corps à un fluide universellement répandu ? Tels sont les deux systèmes qui partagent maintenant les physiciens. ³²

Directement issues de l'héritage newtonien, les théories de l'*émission* considèrent la lumière comme une émanation des corps lumineux. Les corpuscules qui s'en échappent se déplacent sur des trajectoires qui forment les rayons lumineux. Dans un milieu transparent homogène, les rayons sont des droites. Le principe de propagation rectiligne de la lumière se trouve par conséquent établi par analogie avec le *principe de l'inertie* de la mécanique. Quand la lumière se propageant dans l'air est amenée à se réfracter à la rencontre d'un autre milieu diaphane, les particules lumineuses subissent alors des forces de la part du milieu qui tendent à les y faire rentrer. De même, la réflexion de la lumière à la surface d'un miroir fait appel à des forces suffisamment intenses pour repousser les particules lumineuses, animées de très grandes vitesses. Mais la portée de ces forces doit rester très faible pour que la trajectoire du rayon réfléchi ne soit plus modifiée par la suite. Ainsi « la lumière est une matière » selon les mots de Biot qui, partant, est soumise, lorsqu'elle est amenée à se réfléchir ou à se réfracter, à un système de forces tantôt attractives qui tendent à accroître la vitesse des particules, tantôt répulsives qui, au contraire, contribuent à réduire cette vitesse. L'optique physique reste donc sous la tutelle de la mécanique, mère des sciences physiques, et Biot annonce d'emblée la couleur :

Lorsqu'on a trouvé les lois expérimentales des phénomènes, il faut tâcher de les ramener à des causes mécaniques, c'est à dire d'assigner des systèmes de forces capables de produire les mêmes effets.

32. C. Bailly, [BdM40], p. 202.

Car si l'on peut y parvenir, on se trouve élevé à la source même de tous les phénomènes...³³

Les tenants des théories de l'*émission*, comme Laplace, Biot et Malus, sont ainsi amenés à définir pour la lumière une dynamique « ordonnée à l'explication des phénomènes optiques » et un système de forces « manifestement adapté aux effets dont il s'agit de saisir la cause » selon les mots d'André Chappert³⁴ qui souligne bien ici l'insuffisance heuristique de la démarche. L'embarras pour définir ce système de forces tantôt attractives tantôt répulsives apparaît sous la plume de Biot :

(...) la réfraction des rayons lumineux est produite par l'affinité des molécules des corps pour les molécules de la lumière ; affinité analogue à l'action capillaire, et qui, comme elle, ne devient sensible qu'à des distances très petites. Cette conclusion, à laquelle nous conduisent les phénomènes, semble, au premier coup d'œil, contradictoire avec celle que nous avons déduite des expériences sur la réflexion. Car alors les molécules semblaient être repoussées par le corps réflecteur, au lieu d'en être attirées, comme nous le voulons ici. Mais il faut remarquer que les molécules qui se réfléchissent ne sont peut-être pas dans le même état physique, ou dans les mêmes circonstances de mouvement que celles qui se réfractent...³⁵

Dans les théories de l'émission, les premières lois de la photométrie trouvent cependant une justification simple. Dans ce contexte, l'éclairement d'une surface est ramené à la quantité de particules lumineuses reçue par unité de surface et par unité de temps³⁶. Ainsi l'éclairement d'une surface est augmenté à proportion du nombre de sources éclairant la surface et donc à proportion des flux de particules lumineuses émises par les sources (principe d'addition des flux lumineux). La loi de l'*obliquité* est également vérifiée en ramenant simplement la *densité des rayons lumineux* à la densité des particules lumineuses. Enfin, si une source lumineuse, placée au centre d'une sphère de rayon R émet par unité de temps une quantité de particules lumineuses, désignée par la lettre Q , la surface $4\pi R^2$ de la sphère reçoit la quantité de lumière Q

33. Jean-Baptiste Biot, *Traité de physique expérimentale et mathématique*, Paris, Deterville, 1816, tome troisième, p. 190.

34. André Chappert, [Cha04], p. 39

35. J. B. Biot, [Bio16] p. 257.

36. Voir à ce sujet Émile Verdet, *Cours de Physique professé à l'École polytechnique*, tome II, Paris, Masson, 1869, p. 128-130.

pendant l'unité de temps et il en est de même pour une sphère de rayon R' sur la surface $4\pi R'^2$. Les quantités de particules lumineuses, reçues par unité de surface sur chacune des sphères sont inversement proportionnelles à leur surface et sont donc dans le rapport :

$$\frac{q}{q'} = \frac{R'^2}{R^2} \quad (2.1)$$

La loi des distances se trouve ainsi démontrée.

L'autre classe de théories de la lumière soutient que celle-ci « résulte des vibrations d'un fluide élastique infiniment subtil répandu dans l'espace, comme le son des vibrations de l'air »³⁷. Par analogie avec la propagation du son dans les milieux matériels, la jeune science ne peut donc s'affranchir de l'existence d'un milieu de propagation : un fluide infiniment subtil, l'*éther*, est le siège des vibrations lumineuses. Ainsi Gabriel Lamé (1795-1870), dans son cours de l'École polytechnique, professe :

(...) l'analyse des vibrations sonores sert de guide et d'exemple pour concevoir les effets des ondes lumineuses, et l'étude de ces deux genres de phénomènes est facilitée par leur rapprochement. (...) En effet, l'ensemble des phénomènes lumineux signale l'existence d'un fluide universel, étranger aux atomes pesants, avec tout autant de certitude que l'impénétrabilité et la gravitation font conclure l'existence de la matière pondérable.³⁸

La thèse ondulatoire n'est pas nouvelle et hérite de conceptions déjà bien affirmées. S'il est d'usage de lui associer les noms de Christiaan Huygens et de Leonhard Euler, il convient aussi de citer d'autres pionniers de la théorie : Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) en Italie, Ignace Gaston Pardies (1636-1674) et Pierre Ango (1640-1694) en France, Robert Hooke (1635-1703) au Royaume-Uni. Il est coutume de dire qu'après une relative période d'oubli, peut-être dues à la réputation d'infailibilité de Newton, la théorie ondulatoire de la lumière revient à l'honneur grâce aux travaux que Thomas Young et Augustin Fresnel ont consacrés aux phénomènes d'interférences et de diffraction de la lumière. Young réinterprète différents phénomènes décrits par Newton dans son *Optics* : les franges colorées visibles lorsque la lumière d'une source est diffractée par le bord d'un obstacle ; la production des couleurs lors de l'observation d'une source à travers des lames minces. Il rapporte ces phénomènes à une loi générale des interférences qu'il énonce ainsi :

37. Augustin Fresnel, *OC*, tome 2, Paris, Imprimerie impériale, 1868, p. 4.

38. Gabriel Lamé, *Cours de l'École polytechnique*, Paris, Bachelier, 1840, tome deuxième, p. 100-101.

*(...) wherever two portions of the same light arrive at the eye by different routes, either exactly or very nearly in the same direction, the light becomes most intense when the difference of the routes is any multiple of a certain length, and least intense in the intermediate state of the interfering portions; and this length is different for light of different colours*³⁹

Dans son premier mémoire sur la diffraction⁴⁰, Fresnel se livre lui aussi à une analyse critique des interprétations de Newton et il montre comment l'hypothèse ondulatoire associée à ce qu'il qualifiera de « principe des interférences » explique les franges observées lors de la diffraction de la lumière par un bord ou par un fil et en particulier la présence de lumière dans l'ombre portée de l'objet diffractant⁴¹. La vie et l'œuvre d'Augustin Fresnel ont fait l'objet d'une notice biographique complète, lue en séance publique de l'Académie des sciences par François Arago, le 26 juillet 1830⁴². Ce dernier avait participé aux travaux de Fresnel, lorsqu'ils étaient tous deux membres de la Commission des phares. Il rappelle qu'après des études secondaire à l'École centrale de Caen⁴³, Fresnel fut admis en 1804 à l'École polytechnique à l'âge précoce de seize ans et demi ; il y fut remarqué par le célèbre mathématicien Legendre. Puis le jeune Normand intégra l'École des ponts et chaussées. Le jeune ingénieur, devenu fonctionnaire remplit consciencieusement les missions confiées par son administration de tutelle. Destitué pendant les Cent-jours, Fresnel retourne dans la maison familiale de Matthieu, près de Caen où il réalise, avec des instruments de sa fabrication, ses premières expériences sur la diffraction de la lumière et les interférences. Les mémoires de 1815 qui firent

39. Thomas Young, « An Account of some Cases of the Production of Colours, not hitherto described », *Phil. Trans.*, London, 1802, vol. 92, p. 387-397.

40. Augustin Fresnel, « Premier mémoire sur la diffraction de la lumière, où l'on examine particulièrement le phénomène des franges colorées que présentent les ombres des corps éclairés par un point lumineux », adressé à l'Académie des sciences le 15 octobre 1815, *OC*, Paris, Imprimerie impériale, tome 1, 1866, p. 9-33.

41. La présence de lumière dans l'ombre portée n'est pas signalée par Newton. Voir à ce sujet la remarque de Fresnel dans « Théorie de la lumière. Troisième section. Exposition systématique de la théorie des ondulations et controverse. », Extrait du supplément à la traduction française de la chimie de Thomson, 1822, *OC*, Paris, Imprimerie impériale, tome II, 1868, p. 8.

42. F. Arago, *Œuvres*, tome 1, p. 106-183.

43. Les écoles centrales, créées à l'initiative du Comité d'instruction publique (décret du 7 ventôse de l'an III, soit le 25 février 1795), assurent l'enseignement secondaire dans les départements, sous le Directoire. Elles seront remplacées progressivement par les lycées impériaux.

sa renommée sont tirés de ces premiers travaux qui lui permettent d'expliquer ces phénomènes selon l'hypothèse des ondulations⁴⁴ :

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 des unes répondent aux nœuds condensés des autres et se fortifier mutuellement, au contraire, lorsque leurs mouvements sont en harmonie.⁴⁵

Fresnel démontre comment l'observation des franges de diffraction et d'interférences s'explique par l'interaction des rayons lumineux et la composition de leurs ondulations. L'interprétation est impossible dans le contexte de l'émission qui suppose l'indépendance des mouvements des molécules lumineuses à moins de considérer que le phénomène observé n'est qu'apparent et formé dans l'œil de l'observateur :

Il paraît difficile de concevoir un pareil phénomène dans le système de l'émission, où l'on ne peut supposer aucune dépendance entre les mouvements des diverses molécules lumineuses, sans renverser l'hypothèse fondamentale. Il faudrait donc admettre que cette action des rayons lumineux les uns sur les autres n'a point de réalité, n'est qu'apparente : c'est-à-dire, en d'autres termes, que le phénomène se passe seulement dans l'œil, où les chocs successifs des molécules lumineuses contre le nerf optique augmenteraient ou diminueraient les vibrations déjà commencées, selon qu'ils contrarieraient ou favoriseraient le mouvement de ces vibrations naissantes...⁴⁶

Fresnel décrit le phénomène lumineux comme « les vibrations d'un fluide universel agité par les mouvements rapides des particules des corps lumineux.⁴⁷ Dans son modèle, il précise que les particules des corps lumineux sont animées d'un mouvement analogue aux oscillations d'un pendule légèrement écarté de sa position d'équilibre. Les forces de rappel qui ramènent les particules dans leur position d'équilibre peuvent être considérées comme proportionnelles à l'écartement si les oscillations sont de faible amplitude.

44. Voir également sur la période consacrée aux phares : Theresa Levitt, *A Short, Bright Flash Augustin Fresnel and the birth of the modern Lighthouse*, W. W. Norton, New York, 2013.

45. Augustin Fresnel, *OC*, tome 1, p.17, note(a).

46. Augustin Fresnel, *OC*, tome 2, p. 30-31.

47. Augustin Fresnel, *OC*, tome 1, p. 201.

Il s'agit là finalement du modèle de l'*oscillateur harmonique* qui sera abondamment utilisé par la suite en physique classique. Fresnel explique enfin comment l'énergie rayonnée est empruntée à l'énergie du mouvement de ces oscillateurs⁴⁸. La dynamique vibratoire développée par le Normand apporte une définition précise de l'intensité lumineuse.

L'amplitude plus ou moins grande des oscillations des tranches du fluide détermine le degré de vitesse absolue avec laquelle elles se meuvent, et par conséquent l'énergie, mais non pas la nature de la sensation, qui doit dépendre, d'après toutes les analogies, de la durée de ces oscillations.(...) C'est le carré de cette vitesse multiplié par la densité du fluide qui représente ce qu'on appelle la force vive en mécanique, et qu'on doit prendre pour la mesure de la sensation produite ou de l'intensité de la lumière⁴⁹

L'intensité lumineuse, que Fresnel identifie à l'*intensité de la sensation*⁵⁰, est donc directement mesurée par l'énergie *cinétique* (la *force vive*) des molécules d'éther, égale au carré de leur vitesse absolue (qu'il distingue de la vitesse de propagation de l'ébranlement) multiplié par la densité du fluide éthéré. C'est donc une définition purement mécanique qui est donnée à la grandeur fondamentale de la photométrie, indépendamment de toute considération sensorielle. Quant à la nature de la sensation lumineuse, c'est à dire la sensation de couleur, elle est déterminée par la durée de la vibration, c'est à dire sa période. Cela posé, Fresnel est en mesure de démontrer que l'intensité de la lumière doit décroître proportionnellement au carré de la distance au point lumineux et de retrouver, par un raisonnement physique, la loi des distances énoncée par Bouguer⁵¹. Il va plus loin en utilisant la nature progressive de l'onde lumineuse dont la longueur d'ondulation (longueur d'onde, Fresnel utilise le terme « épaisseur ») reste constante tandis que son étendue, et donc la masse de fluide déplacé, augmente comme le carré de la distance à la source de l'ébranlement. Il en déduit que, puisque le carré des vitesses diminue à raison inverse du carré des distances, *la somme des forces vives comprise dans l'onde reste constante*⁵². Ainsi conclut-il :

Et voilà principalement pourquoi la force vive doit être considérée comme la mesure de la lumière, dont la quantité totale reste tou-

48. Augustin Fresnel, *OC*, tome 2, p. 38.

49. Augustin Fresnel, *OC*, tome 2, p. 42-43.

50. Augustin Fresnel, *OC*, tome 1, p. 316.

51. Pour une démonstration voir Éleuthère Mascart, *Traité d'optique*, tome 1, Paris, Gauthier-Villars, 1889, p. 15.

52. Augustin Fresnel, *OC*, tome 2, p. 44.

jours à très-peu près la même, tant qu'elle ne traverse du moins que des milieux bien transparents.⁵³

Fresnel jette ainsi les bases d'une dynamique vibratoire de l'éther. En identifiant l'intensité lumineuse à la *force vive* des molécules d'éther, la théorie des ondulations apporte une définition claire à la grandeur fondamentale de la photométrie. Par le modèle des ondes sphérique progressives, elle justifie les lois de la photométrie énoncées par Bouguer et Lambert. Pour autant, la définition de l'intensité avancée par Fresnel reste théorique. Mais des physiciens comme Mascart défendront longtemps encore cette position purement physique (supra p. 59).

À la fin du siècle, la question se posera encore dans les mêmes termes. Dans son enseignement de physique mathématique, Henri Poincaré ne s'interdit pas de soulever la question de l'intensité lumineuse et suggère d'en donner deux définitions, l'une expérimentale permettant sa mesure, l'autre théorique⁵⁴. On peut en effet définir expérimentalement l'intensité lumineuse à partir des trois effets de la lumière — physiologique, chimique (ou photographique) et calorifique — connus à l'époque. Poincaré s'empresse de souligner que les définitions correspondant à chacun de ces effets ne sont pas équivalentes et c'est la mesure des effets photographiques qui semble recevoir sa faveur :

deux lumières ont une égale intensité quand elles produisent dans le même temps la même action sur une plaque photographique.⁵⁵

Pour autant, le Lorrain ne précise pas comment est évaluée l'identité d'effet sur l'émulsion argentique. Reste à établir le lien entre la définition expérimentale de l'intensité lumineuse et sa définition théorique qui décrit l'intensité lumineuse comme proportionnelle à la moyenne de la force vive de l'éther. En appelant ρ la masse volumique de l'éther, v la vitesse de la particule d'éther de volume $d\tau$, cette force vive moyenne est exprimée par :

$$\rho d\tau \frac{v^2}{2} \tag{2.2}$$

Le mouvement de la particule d'éther est représenté par une elongation périodique de période T

$$\xi = A \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \tag{2.3}$$

53. Augustin Fresnel, *ibid.*, p. 44.

54. Henri Poincaré, *Théorie mathématique de la lumière*, tome 2, Paris, Georges Carré, 1892, p. 8-15.

55. Poincaré, *ibid.* p.9.

Comme la vitesse est

$$v = \frac{d\xi}{dt} \quad (2.4)$$

la moyenne de la force vive ramenée à l'unité de masse s'écrit :

$$\frac{A^2}{2} \frac{4\pi^2}{T^2} \quad (2.5)$$

L'intensité lumineuse est donc proportionnelle au carré de l'amplitude du mouvement vibratoire. Cependant la difficulté d'établir le lien entre les effets macroscopiques de la lumière et la force vive des molécules d'éther n'échappe pas à l'illustre mathématicien :

Il n'est nullement évident que l'on définisse ainsi la même chose que par la définition expérimentale. Nous sommes tout aussi bien en droit de supposer que l'action photographique est proportionnelle, non pas à l'énergie cinétique moyenne, mais à l'énergie potentielle ou à l'énergie totale moyenne.⁵⁶

Tout au long du siècle, la définition théorique de l'intensité lumineuse reste ainsi assujettie au modèle mécanique de l'onde lumineuse. Dans les dernières décennies du siècle, les expériences de Heinrich Hertz (1857-1894) confirment la réalité des ondes électromagnétiques prédites par James Clerk Maxwell (1831-1879). L'identification de l'onde lumineuse à l'onde électromagnétique permet à l'intensité lumineuse de trouver la signification physique telle que nous lui attribuons aujourd'hui : le carré de l'amplitude du champ électrique de l'onde, établie désormais comme variable lumineuse.

2.4 Photométrie pratique : l'éclairage des côtes françaises

Si la définition de l'intensité lumineuse reste en suspens, c'est aussi avant tout parce que les premiers photomètres du siècle sont appelés par l'État à résoudre des problèmes pratiques. Ainsi, dans son mémoire « Sur la proportion de lumière que produisent différents combustibles, et sur le rapport de clarté obtenue de différentes lampes, en raison de l'huile que l'on emploie », le citoyen Hassenfratz (Jean-Henry Hassenfratz, 1755-1827) déclare en préambule :

LE gouvernement me chargea, l'an 3 de la République, de faire des expériences pour déterminer le moyen d'obtenir la lumière la plus

⁵⁶. Poincaré, *ibid.* p.11.

économique, soit en comparant la valeur à la consommation des différents combustibles, soit en variant la manière de les employer.

Je fis, dans les six mois de Vendémiaire à Ventose de l'an 4, un grand nombre d'expériences pour résoudre cette question ;⁵⁷

Par cette étude réalisée de l'automne 1795 à la fin de l'hiver 1796, Hassenfratz souhaite « diriger pour un moment l'attention publique sur une question d'économie domestique qui peut intéresser toutes les classes de la société »⁵⁸. Il faut comparer les lumières produites par les différents combustibles (huiles de baleine, suif, huiles de pavot, de poisson, de colsa (sic) mais aussi répondre à la question de savoir si les lampes à double courant d'air et à mèche cylindrique « dites d'Argant ou à la *Quinquet* », consomment moins d'huile que les lampes ordinaires, à mèche plate, pour la même lumière fournie. Ce

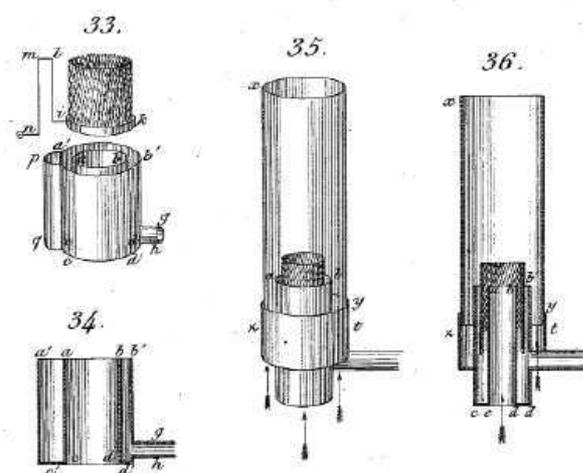


fig. 2.1 – Bec d'Argand. D'après Eugène Pécelet, *Traité de l'éclairage*, 1827, Pl. 2.

modèle, inventé par Argand (supra, p. 54) a été copié par Antoine Quinquet (1745-1803). Appelé « à double courant d'air », il est équipé d'une mèche cylindrique, enchâssée entre deux cylindres métalliques, coaxiaux, formant le bec. L'huile remplit l'espace entre les deux cylindres et son niveau est maintenu de telle sorte qu'elle arrive à la hauteur des bords supérieurs des cylindres. Une cheminée de verre entoure le dispositif. La flamme circulaire est ventilée à la fois par le flux d'air intérieur à la flamme et par le flux extérieur à la mèche et le verre de la cheminée. La combustion complète de

57. Jean-Henry Hassenfratz, « Sur la proportion de lumière que produisent differens combustibles, et sur le rapport de clarté obtenue de différentes lampes en raison de l'huile que l'on emploie », *Annales de chimie*, Paris, 1797, tome 24, p. 78-104.

58. Hassenfratz, *ibid.*, p. 79-80.

l'huile est assurée, ce qui évite la formation de suie et fournit un éclat bien supérieur aux lampes à mèches plates⁵⁹.

Le travail d'Hassenfratz fait suite à une étude effectuée en 1785 par Monge et Alexandre-Théophile Vandermonde (1735-1796), à la demande de l'Académie des sciences. Les deux mathématiciens ont utilisé la méthode des ombres initiée par Bouguer qui en a déterminé la sensibilité.

Pour comparer les forces des différentes lumières, j'ai employé le procédé indiqué par Bouguer, et qui a été pratiqué, en 1785, par les citoyens Vandermonde et Monge, lorsqu'ils furent chargés, par l'académie des sciences, de comparer la force de la lumière produite par les lampes à courant d'air. Le comte Rumford a fait usage du même moyen : il consiste à mettre les deux lumières à deux distances différentes d'un morceau de papier blanc, de placer près de ce papier un petit cylindre opaque, et d'écartier les lumières jusqu'à ce que l'ombre portée par chacune d'elles ait la même intensité. La force de la lumière est en raison des quarrés des distances des corps lumineux à la ligne de rencontre des deux ombres sur le papier blanc.⁶⁰

Hassenfratz attribue clairement la primauté de la méthode des ombres à Bouguer et il évoque la principale difficulté rencontrée que signaleront tous les photomètres du siècle : la différence des teintes des flammes à comparer. Il remarque aussi la différence des couleurs des ombres selon l'intensité lumineuse.

(...) la lumière des lampes à courant d'air étant toujours très rouge par rapport aux autres, sur-tout par rapport à celles des lampes ordinaires, la différence dans les teintes empêchoit que l'on ne pût comparer aussi facilement les forces d'intensité.

Lorsque l'on compare entre elles deux lumières d'intensité différente, on apperçoit deux couleurs d'ombre ; celle qui est portée par la plus foible lumière est bleue et celle de la plus forte est rougeâtre.⁶¹

59. Sur ce sujet, lire les indications d'Eugène Pécelet, *Traité de l'éclairage*, Paris, de Mahler, 1827, p. 86-92 et de Louis Figuier, *L'art de l'éclairage*, 2ème édition, Paris, Juvet, 1887, p. 15-26

60. Hassenfratz, [Has97], p. 79-80.

61. Hassenfratz, [Has97], p. 82-83.

L'étude d'Hassenfratz passe de la pratique expérimentale à des préoccupations économiques quand il s'agit d'exprimer en francs, sols et deniers les coûts de chaque type de lumière. Cette financiarisation de la lumière, présente dans toutes les études de ce type, autant en France qu'à l'étranger, révèle bien, en cette époque « des lumières » les besoins de sociétés toujours en souffrance des comforts les plus élémentaires que sont le chauffage et l'éclairage. Mais au-delà de la satisfaction de ces besoins domestiques, l'État, quels que soient les régimes qui vont se succéder dans cette période troublée de l'histoire de France va devoir solliciter les experts photomètres pour un programme d'envergure : l'éclairage des côtes françaises.⁶²

Au début du siècle, la question de l'éclairage des côtes devient une priorité. Les plaintes des pilotes sont continuelles. Ils déplorent la pauvreté des équipements affectés à la sécurité de la navigation dans les eaux françaises. À l'orée du siècle, la signalisation du littoral est, en bien des endroits, assurée par des moyens rudimentaires. Les sources lumineuses des fanaux et des phares se limitent souvent à des foyers de houille ou à de simples chandelles et, dans le meilleur des cas, à des réverbères à mèches plates et fumeuses. Leur entretien se révèle épuisant pour le personnel. Le 29 avril 1811, à l'initiative du comte Molé (Louis-Mathieu Molé, 1781-1855), directeur général des Ponts et Chaussées, est décidée la création d'une commission appelée à s'occuper « de la meilleure répartition et disposition à faire des phares de France, sur l'universalité des côtes de l'Empire, pour le plus grand avantage de la navigation. » Cette commission mixte serait composée de trois officiers supérieurs de la marine, de trois inspecteurs des Ponts et Chaussées et de trois membres de la première classe de l'Institut. Ne siègeront en fait, dans la première *Commission des phares*, que deux membres de l'Académie : Étienne-Louis Malus, officier du génie, et le physicien Jacques Alexandre César Charles (1746-1823). En 1813, François Arago viendra remplacer Malus après le décès de ce dernier en février 1812. Si l'initiative du comte Molé vient à point nommé, la tâche est immense : c'est un système complet et cohérent de feux suffisamment puissants qu'il faut installer sur les côtes de la Manche, de l'Atlantique et de la Méditerranée. Il faut récolter toutes les données hydrographiques, remettre en états ou renouveler les équipements existants, réaliser enfin les comparaisons photométriques des appareils catoptriques équipant les phares.

Au cours de ces décennies charnières, plusieurs essais sont menés pour améliorer les modestes performances des phares catoptriques, c'est à dire

62. Voir en particulier, Élodie Bertrand, Vincent Guigueno, « Financer les phares en France et en Angleterre : l'exemple de Cordouan », in Anne Conchon, David Plouviez, Éric Szulman (dir.), *Le financement des infrastructures de transport XVII^e-début XIX^e siècle*, Institut de la gestion publique et du développement économique, 2018, p. 243-260.

dont les lanternes sont munies de miroirs sphériques ou paraboliques. Les recherches sont guidées par la nécessité de réaliser des feux à éclipse émettant un faisceau parallèle dirigé vers l'horizon, ceci afin d'éviter aux navigateurs toute confusion avec des feux accidentels. Un progrès notable est réalisé par l'invention d'un système tournant de réverbères paraboliques, essayé pour la première fois au phare de Marstrand en Suède. En 1794, un appareil analogue est installé en France, au sommet du phare de Cordouan, au large de l'estuaire de la Gironde. Mais c'est l'exception. Arago et son collègue Charles, auxquels va se joindre Élisabeth-Paul-Édouard de Rossel (1765-1829) vont réaliser ainsi plusieurs expertises à l'instar de celle effectuée sur un phare à réflecteur parabolique d'Étienne Lenoir (1744-1832)⁶³. Cette dernière étude décidée par la Commission des phares doit déterminer le diamètre du bec à double courant d'air qui offre la lumière la plus vive à grande distance. La première expérience consiste à évaluer l'intensité des ombres d'une tige opaque, portées sur un écran blanc, placé à une distance de 50 mètres des réverbères en comparaison. Il en ressort que le bec muni de la mèche de plus faible diamètre fournit l'ombre la plus lumineuse. Ce fait doit être vérifié pour une distance bien plus considérable. La seconde expérience est effectuée entre la tour de Montlhéry et la butte Montmartre, distantes de 28000 mètres. À une telle distance, la méthode des ombres ne peut s'appliquer et c'est avec une simple lunette que les commissaires peuvent apprécier, *au jugé*, les différences d'éclats entre les réverbères.

L'ampleur du travail conduit Arago à demander de se faire seconder par l'astronome Claude-Louis Mathieu (1783-1875) et par Augustin Fresnel, déjà renommé pour ses études sur la lumière. Léonor Fresnel (1790-1869) raconte que son frère Augustin aurait dû être occupé au Cadastre du pavé de Paris. Ce service de l'administration des Ponts et Chaussées s'occupe du pavement des rues de la capitale et de son entretien. Dupain, chef de section à la préfecture de la Seine donne en 1881 ces précisions :

Sauf quelques vérifications faites en 1806, par un conducteur du service, il n'avait pas été procédé, depuis 1748, à une constatation exacte, et rue par rue, de la surface pavée à entretenir. (...) Le Directeur général des Ponts et Chaussées décida, le 25 janvier 1820, qu'un ingénieur ordinaire, secondé par un conducteur et plusieurs géomètres ou commis, serait chargé de cette grande opé-

63. Jacques Charles, Édouard de Rossel, François Arago, « Sur un phare à réflecteur parabolique de M. Lenoir », *Annales de chimie*, Paris, 1815, tome 96, p. 59-71.

ration qu'on appelait le *Cadastré du pavé de Paris*. Elle a duré cinq ans...⁶⁴

Léonor Fresnel révèle encore que Louis Becquey (1760-1849), qui avait succédé à Molé à la direction des Ponts et Chaussées, avait placé Augustin à ce poste « pour le mettre à portée de poursuivre, sans renoncer à son emploi d'ingénieur, ses recherches sur la théorie de la lumière. » C'est encore grâce à la bienveillance de Becquey que Fresnel échappa à ses fastidieuses obligations et fut autorisé à rejoindre Arago, décision actée en date du 21 juin 1819⁶⁵.

L'une des premières missions de la commission est de mener les campagnes de mesures afin de déterminer les performances des appareils catoptriques existants et de ceux proposés par les inventeurs. Le cahier des charges imposé aux constructeurs implique la résolution de problèmes ardues. Il est en effet essentiel pour les appareils à feu fixe de réaliser une bonne divergence horizontale du faisceau, afin de distribuer la lumière dans tous les azimuts, alors que cela n'est nécessaire que jusqu'à un certain point pour les appareils à *éclipses*. Or, il est constaté que les réverbères paraboliques offrent des résultats satisfaisants pour les feux à éclipses mais pas pour les feux fixes. Isaac-Ami Bordier-Marcet (1768-1835), le cousin par alliance d'Ami Argand, s'était déjà attaqué au problème en réalisant deux appareils : un réflecteur à double effet qui fut installé en 1811 au cap de la Hève, près du Havre, et un réverbère sidéral dont plusieurs exemplaires seront utilisés pour les fanaux de marée, à l'entrée des ports. L'ingénieur lampiste, successeur d'Argand, ainsi qu'il se qualifie, continuera ses travaux sur les réverbères paraboliques qu'il présentera à l'Exposition des produits de l'industrie française (pour la cinquième et la sixième édition, en 1819 et en 1823)⁶⁶. Mais la catoptrique de l'éclairage va très rapidement se trouver concurrencée par la technologie dioptrique.

Les expertises menées par Augustin Fresnel sur les réverbères paraboliques le conduisent à proposer à la commission, dès le mois d'août de l'année 1819, la fabrication et l'essai d'un système lenticulaire, les fameuses lentilles à échelon qui feront la renommée du physicien. Le nouveau dispositif offre

64. S. Dupain, *Notice historique sur le Pavé de Paris*, Paris, Charles de Nourgues frères, 1881, p. 269.

65. Léonor Fresnel, *Introduction aux mémoires, notes et fragments d'Augustin Fresnel sur les phares*, in Augustin Fresnel, *OC*, tome 3, 1870, p. xxiv.

66. Isaac-Ami Bordier-Marcet, « Notice descriptive d'un fanal à double aspect de nouvelle invention ; d'un système de fanaux à double aspect pour un phare à feu mobile ; de ses effets catoptriques et de ses avantages ; présenté à l'Exposition de l'industrie française de 1823 », *Annales de l'industrie nationale et étrangère ou Mercure technologique*, Paris, Bachelier, 1823, tome 11, p. 258-282.

de multiples avantages sur les miroirs paraboliques et, en premier, l'augmentation de la quantité de lumière utile. Les réverbères des phares doivent en effet concentrer le maximum de lumière en un faisceau parallèle, dirigé vers l'horizon. Or, comme le souligne Léonor Fresnel, « la presque totalité du cône de rayons directs ayant pour sommet le bec de la lampe focale, et pour base l'ouverture circulaire d'un miroir parabolique, est perdue à la mer pour l'effet utile. »⁶⁷ Le système lenticulaire permet au contraire de ramener tous les rayons dans le faisceau parallèle, dirigé vers l'horizon. De plus, la position de la lampe au foyer du miroir, à proximité de sa surface argentée, provoque l'encrassement de cette dernière qui demande un astiquage journalier. Cette contrainte disparaît avec un dispositif à lentilles puisque la lampe, placée au centre du dispositif, est tenue éloignée des lentilles.

En même temps qu'il travaille à la conception et à la fabrication de ses panneaux dioptriques⁶⁸, Fresnel, accompagné d'Arago, lance un programme d'expériences sur les becs à mèches simples et à mèches multiples, censés produire une densité de lumière suffisante pour illuminer le dispositif.

J'ai l'honneur de proposer à la Commission de résoudre par l'expérience les questions suivantes, qui me paraissent d'une haute importance pour le perfectionnement de l'éclairage des phares :

- 1° Les mèches multiples ne peuvent-elles pas présenter plus d'avantage que les mèches simples ?
- 2° Quel est le système de lampe le moins compliqué et le plus propre à fournir constamment à une mèche la quantité d'huile nécessaire pour produire le maximum de lumière ?⁶⁹

L'idée des mèches multiples pour obtenir des densités de lumière importante avait été proposée par Rumford et, avant lui, par Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1816)⁷⁰. Les expertises menées par Fresnel, Arago et Mathieu demandent la création de prototypes et de nombreux essais qui sont, pour beaucoup, réalisés à l'Observatoire de Paris. Les préoccupations de Fresnel sont de deux ordres : économique et photométrique. Le but de tous ces essais est en effet de connaître précisément les consommations en huile de chacun

67. Léonor Fresnel, [Fre70], p. xxx.

68. Léonor Fresnel précise que « le 12 mai 1820, la commission des phares assista à l'essai d'illumination d'une lentille polygonale de 70 centimètres de foyer, par un bec à quatre mèches concentriques brûlant 700 à 750 grammes d'huile par heure... »

69. Augustin Fresnel, « Phares et appareils d'éclairage », *OC*, tome 3, p.13.

70. Louis Bernard Guyton de Morveau, « Nouveaux moyens de fournir, presque sans frais, le feu et l'eau pour les expériences chimiques », *Annales de chimie*, Paris, chez Guillaume et Fuchs, 1797, tome 24, p. 310-326.

des becs, afin d'évaluer les coûts d'exploitation. L'huile — il s'agit sans doute ici d'huile de colza — est un produit onéreux, vendu selon les estimations de Fresnel, autour de 1,5 franc le kilogramme. À titre de comparaison, le salaire annuel d'un gardien de phare est de 600 francs, soit un salaire journalier d'environ deux francs. Ainsi, selon les calculs de Fresnel, le fonctionnement d'un système lenticulaire consomme annuellement 2920 kilogrammes d'huile, pour une dépense de 4380 francs, tandis que les salaires des deux gardiens représentent seulement 1200 francs⁷¹. Il faut aussi établir les caractéristiques photométriques des appareils d'éclairage et comparer les performances des becs en termes de quantité de lumière produite. Les notes et les rapports d'expertise rédigés par Fresnel démontrent que les instruments de mesures photométriques n'ont guère évolués depuis l'époque de Bouguer. Dans une première note datée du 27 septembre 1819⁷², Fresnel présente ainsi les résultats pour la comparaison photométrique de deux mèches simples :

Nous avons d'abord comparé deux mèches simples ayant, l'une... de diamètre, et l'autre...[20 millimètres]. (...) Les deux mèches éclairaient également bien le carton, lorsqu'il était à 3^m,43 de la petite et à 3^m,86 de la mèche ordinaire. Les deux ombres nous paraissaient alors d'une intensité égale, mais de teintes sensiblement différentes (...) D'après les distances indiquées ci-dessus, l'intensité des la lumière produite par la petite mèche était les $(\frac{3,43}{3,86})^2$ ou les 0,79, c'est à dire les $\frac{4}{5}$ [de la lumière produite par la mèche de calibre ordinaire].

Un peu plus loin, Fresnel fournit les résultats de la comparaison entre un bec ordinaire et un bec double portant deux mèches concentriques :

Les deux lumières, reçues sur le même carton, nous paraissaient d'égale intensité, lorsqu'il était à 4^m,06 du bec double et à 2^m,15 du bec ordinaire. Ainsi, en prenant toujours pour unité l'intensité du bec ordinaire, celle du bec double était égale à $(\frac{4,06}{2,15})^2$ ou à 3,57.

La méthode utilisée par Fresnel est manifestement la méthode des ombres initiée par Bouguer et développée par Rumford. L'une des sources lumineuses sert de référence et son intensité est prise pour unité. Les étalons de lumière privilégiés par Fresnel sont la lampe de Carcel et le bec de Quinquet (supra p. pagerefQuinquet). Mise au point par Bertrand Guillaume Carcel (1750-1812), la lampe dite « lychnomena » est pourvue d'une pompe actionnée par

71. Augustin Fresnel, *OC*, tome 3, p. 87.

72. Augustin Fresnel, *ibid.*, p. 29-30.

un mécanisme d'horlogerie⁷³. Le dispositif assure une alimentation constante en huile du brûleur à mèche cylindrique. Fresnel, qui travailla également à l'amélioration de l'éclairage urbain, donne le compte rendu suivant des essais d'un fanal catadioptrique, destiné à l'illumination des quais du canal Saint-Martin à Paris :

Ce fanal était éclairé par la lampe de Carcel, dont la flamme était bien développée, quoique sans excès. Le grand quinquet a servi d'*unité de lumière*, comme dans les expériences précédentes.⁷⁴

Les résultats de l'expérience exécutée le 31 janvier 1827 sont les suivants :

- pour le grand quinquet : distance d'*équiombre* : 1^m,25 pour une intensité de 1 ;
- pour le fanal en expérience : distance d'*équiombre* : 7^m,04 pour une intensité de 31,72.

En dépit des résultats éclatants de la technique lenticulaire, Bordier-Marcet ne s'avoue pas vaincu et soumet son *fanal à double effet* à sa propre expertise. À l'occasion de l'Exposition des produits de l'industrie française de 1823, il affiche les performances suivantes pour son appareil :

Deux de mes fanaux à double effet, l'un de 29, l'autre de 24 pouces, éclairés par des mèches de 8 lignes^[75], ont été comparés à la bougie et reconnus équivalents, l'un à 4700 bougies, l'autre à 3800. D'après ces bases, les fanaux du système ayant 26 pouces et étant éclairés par une lampe mécanique de 9 lignes, devaient équivaloir au moins à 4500 bougies ou 500 lampes de Carcel ; mais deux expériences faites dans mon atelier, qui n'est pas très-propice à ce but, n'ayant donné pour terme moyen des deux aspects qu'une intensité égale à 400 et à 267 lampes, c'est à ces quantités seulement que j'évalue l'éclat total de chaque fanal, c'est-à-dire, pour les deux aspects, à 667 lampes, et pour tout le système, à 4000 lampes de Carcel, savoir , à 2000 lampes sur un point, et à 2000 sur le point opposé. Il est à observer que cet

73. Bertrand Guillaume Carcel, Louis Carreau, Brevet d'invention pour une « Lampe nommée Lychnomena, dont l'huile est élevée à la mèche par des moyens mécaniques », 1800, base des brevets du 19^e siècle INPI.

74. Augustin Fresnel, *OC*, tome 3, p. 305.

75. Pour rappel, une ligne équivaut à environ 2,26 mm.

effet est produit avec six lampes seulement, qui ne consomment entre elles qu'un tiers à peu près de l'huile que brûle la grande lampe à mèches concentriques.⁷⁶

Les *unités* de lumière utilisées par l'ingénieur suisse sont cette fois la bougie et la lampe de Carcel. À la fin du premier quart du siècle, les lampistes et les experts de la Commission des phares ne disposent donc toujours pas de l'étalon lumineux qui assurerait la reproductibilité de leurs mesures.

Dans une lettre datée du 26 avril 1825 et adressée à Robert Stevenson (1772-1850), ingénieur des phares d'Écosse, Fresnel fait ainsi part des résultats des mesures photométriques, pour la lumière fournie par de nouvelles lentilles sorties des ateliers de Jean-Baptiste Soleil (1798-1878) :

En illuminant toujours la lentille par une lampe portant quatre mèches concentriques, j'ai trouvé que l'intensité de la lumière suivant l'axe équivalait à 3,960 lampes de Carcel. Dans l'expérience que j'avais faite avec vous, en employant une des lentilles qui vous ont été envoyées, nous n'avions trouvé que 2,443 lampes de Carcel ; c'est à dire que l'intensité de la lumière serait augmentée de plus de moitié...⁷⁷

Une note de Léonor Fresnel commente ce résultat et met en évidence la difficulté des évaluations photométriques avec les moyens dont disposait son frère Augustin à l'époque :

Ce résultat nous semble un peu fort. Au surplus, les expériences photométriques dans lesquelles on compare les intensités des ombres portées simultanément par une lampe prise pour unité et une lentille de verre illuminée par une flamme focale, ne comportent pas une grande précision, eu égard à la différence de couleur des deux ombres, l'une verdâtre et l'autre rougeâtre.⁷⁸

C'est un fait connu à l'époque que la comparaison photométrique est rendue d'autant plus difficile que les couleurs des deux sources sont différentes. Pour autant, l'amélioration du dispositif de mesure photométrique ne semble guère préoccuper Fresnel. Parmi toutes les notes rassemblées par son frère Léonor, aucune ne fait mention d'une recherche sur l'amélioration de la méthode. L'expertise de l'ingénieur se focalise avant tout sur la technologie des becs

76. Isaac-Ami Bordier-Marcet, [BM23], p. 265.

77. Augustin Fresnel, *OC*, tome 3, p. 206.

78. Augustin Fresnel, *OC*, tome 3, p. 206.

lumineux et sur leurs performances. Les efforts se concentrent sur l'alimentation continue du bec en combustible, problème en partie résolu par la mise en service d'une pompe actionnée par un moteur à poids ou à ressort. La construction de l'horlogerie assurant l'alimentation de la lanterne est confiée à la maison Wagner (Bernard-Henri Wagner, 1790-1855). À partir de 1823, et quasiment jusqu'à sa mort, Fresnel travaillera aussi à l'expérimentation des becs à gaz. L'emploi du gaz pour l'illumination des phares, préconisé dès 1823 par Giovanni Aldini (1762-1834)⁷⁹, fera l'objet d'une importante campagne de mesures photométriques. Le gaz est produit dans un gazomètre installé à proximité de la lanterne, par distillation de différents composés : houille (charbon de terre), huile d'origine végétale ou animale, huile de récupération, résine. Les becs mis en expérience peuvent comporter jusqu'à cinq couronnes concentriques, pour un diamètre atteignant 124 mm. Les résultats de ces expériences nombreuses ont de quoi laisser songeur, ainsi de l'expérience du 19 juin 1823 « sur l'effet d'une grande lentille annulaire illuminée par un bec à trois couronnes concentriques ». Fresnel annonce les valeurs suivantes pour les distances d'*équ ombre* au carton : 2,97 m pour le bec ordinaire de lampe contre 97,00 m pour la grande lentille ! Et Fresnel conclut :

Ainsi l'effet de la grande lentille équivalait à $(\frac{97}{2,97})^2$ fois celui du bec ordinaire alimenté par de l'huile surabondante, c'est à dire à 1067 becs ordinaires.⁸⁰

De 1819, date de sa nomination à la Commission des phares, jusqu'à sa mort en 1827, Fresnel usera dans ses expertises photométriques des mêmes techniques de mesures que celles élaborées par Bouguer et Thompson. Les ingénieurs lampistes feront de même. La technologie de l'éclairage, toujours fondée sur une combustion à l'air libre, n'est pas encore parvenue au point d'apporter l'étalon dont la lumière constante assurerait la reproductibilité des mesures. Mais dans sa position d'expert plutôt que de scientifique, Fresnel s'attache surtout à démontrer la supériorité de tel équipement lumineux sur tel autre, en l'occurrence celle de la technique lenticulaire sur les appareils catoptriques. Il met en parallèle les coûts de fabrication et d'entretien des appareils et leurs performances. La précision de ses mesures, pour modeste qu'elle soit, et leur manque de reproductibilité ne l'empêchent pas d'apporter dans ses conclusions les arguments en faveur des solutions proposées. Il en est de même pour les lampistes comme Bordier-Marcet qui doivent démontrer leur savoir-faire et la conformité de leur production au cahier des

79. Giovanni Aldini, *Saggio di osservazioni sui mezzi atti a migliorare la costruzione et l'illuminazione dei fari*, Milano, Dall' imperiale regia stamperia, 1823, p. 129-158.

80. Augustin Fresnel, *OC*, tome 3, p. 309-310.

charges défini par la Commission des phares. La question de l'éclairage des côtes n'a donc pas permis à la science photométrique de progresser de façon significative. Cependant, les travaux de la Commission des phares, associant autorités maritimes et scientifiques, ont permis en quelques années de doter le royaume d'un système cohérent et efficace pour l'éclairage de ses côtes. C'est aussi à cette occasion qu'est menée, peut-être pour la première fois, une étude systématique des feux à éclipses et de l'influence de la durée des éclats sur la perception d'un signal lumineux⁸¹.

2.5 Photométrie atmosphérique

En date du 5 août 1833, en séance de l'Académie des sciences, François Arago commence son exposé sur la photométrie par les mots suivants :⁸²

L'optique a fait, depuis un tiers de siècle, des progrès brillants et inespérés. Une seule branche de cette science, celle qui traite de la mesure des intensités, celle qu'on a désignée par le nom de photométrie, est restée à peu près stationnaire.⁸³

La pertinence de cette remarque doit se vérifier par l'examen de diverses sources qui permettent de se faire une idée de l'état de l'instrumentation photométrique au moment de la communication d'Arago. Dans *La clef de l'industrie et des sciences qui se rattachent aux arts industriels*⁸⁴, pour l'article *Photomètres*, Jean-Regnault Armonville (1786-1837) recense dix références dans la période courant de 1791 jusqu'à la fin de l'année 1824. De même, la table générale, raisonnée des matières contenues dans les *Annales de chimie* et la table générale des *Annales de chimie et de physique* font apparaître, pour la période comprise entre l'année 1789 et l'année 1840, seulement sept publications consacrées aux photomètres et aux caractérisations des luminaires

81. Voir à ce sujet le compte-rendu de l'expérience menée à Montmélian, le 9 octobre 1823 (Augustin Fresnel, *OC*, tome 3, p. 184-188).

82. Une note précise que la teneur de cet exposé a été reproduite par Jacques Babinet (1794-1872) dans un précis placé en appendice du tome 2 du *Traité de la lumière* de John Frederick William Herschel (1792-1871) et intitulé *Mémoire sur la loi du carré du cosinus*.

83. François Arago, « Mémoire sur les moyens de résoudre la plupart des questions de photométrie que la découverte de la polarisation de la lumière a fait naître », *Œuvres complètes*, tome 10, Paris, Gide, 1858, p. 150.

84. Créé par Jean-Regnault Armonville, professeur au Conservatoire des arts et métiers, cet ouvrage constitue une table générale où sont classées par matière les publications relatives à l'industrie du *Conservatoire royal des Arts et Métiers*, les *Brevets d'Invention*, de *Perfectionnement* et d'*Importation délivrés en France depuis 1791, époque de leur création, jusqu'à la fin de 1824* et les articles de *138 Ouvrages périodiques et autres français et anglais, parmi les plus estimés*.

par les méthodes photométriques. Quant à la base des brevets d'invention du XIX^e siècle, accessible sur le site de l'INPI (Institut national de la propriété industrielle), elle ne possède, pour la période de 1791 à 1840, que la notice d'un unique brevet déposé en 1815 par Bordier-Marcet pour un « appareil d'éclairage à deux cheminées et à trois courants d'air, propre à remplacer vingt-quatre lampes d'Argand, nommé photomagistre, ou photomètre » qui ne constitue pas, à proprement parler, un instrument destiné à la mesure de la lumière. La rareté des publications consacrées explicitement à la photométrie se constate également dans les revues de l'étranger : pour la même période, le sujet apparaît deux fois dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Outre-Rhin, la table complète des sujets publiés dans les *Annalen der Physik und der Physikalischen Chemie* de 1790 à 1824, sous la direction de Gilbert (Ludwig Wilhelm Gilbert, 1769-1824) n'indique que deux auteurs en lien avec la photométrie : William Herschel, le célèbre astronome et John Leslie (1766-1832). Pour l'essentiel, ces rares études font toujours usage des méthodes établies par Bouguer et perfectionnées par Rumford. Ainsi de l'expertise de Charles et d'Arago sur le réflecteur de Lenoir (supra 2.4) qui montre qu'en 1815, l'instrumentation photométrique en France reste cantonnée à la méthode *équivalente*. Outre-Manche, dans une publication plus tardive de 1829, Wollaston rend compte de ses expériences de comparaison de la lumière du Soleil avec celle émise par les étoiles fixes⁸⁵. Le médaillé Copley utilise une méthode de gradation de la lumière des astres, inspirée de Bouguer. L'utilisation d'une sphère réfléchissante permet en effet de réduire dans un rapport connu l'éclairement dû à une source très intense. C'est ainsi que Wollaston peut comparer la lumière du Soleil à celle de Sirius⁸⁶. L'expérience nécessite deux observations successives : la lumière solaire, réfléchie par le bulbe sphérique d'un thermomètre à mercure est d'abord comparée à une lumière de référence, celle d'une bougie réfléchie également par le bulbe d'un thermomètre. Ensuite, l'observation nocturne de l'étoile fixe (Sirius) compare sa lumière, recueillie par un télescope, à celle de la bougie, réfléchie dans les mêmes conditions.

Pour autant, parmi les travaux publiés après ceux de Bouguer, certains font état de méthodes indirectes qui ne sont pas fondées sur une égalisation visuelle. L'idée est de mesurer l'intensité de la lumière par des méthodes physiques ou chimiques objectives et d'utiliser à cette fin ce que les savants britanniques appellent un *philosophical instrument*⁸⁷. En 1787, Horace Béné-

85. William Hyde Wollaston, « On a method of comparing the light of the sun with that of the fixed stars. », *Phil. Trans.*, 1829, Vol. 119, p. 19-27.

86. Lire sur ce point H. Bouasse, *Optique et photométrie dite géométriques*, Paris, Delagrave, 1937, p. 96-98 et p. 548-549.

87. Voir la description de ces instruments de physique et en particulier d'optique qu'en

dict de Saussure (1740-1799) effectue une tentative de mesure de la lumière du ciel par ses effets chimiques⁸⁸. L'expérience effectuée au sommet du Mont Blanc est fondée sur la décomposition de l'*acide muriatique oxygéné*⁸⁹ par la lumière. Dans ses « réflexions sur l'acide muriatique oxygéné employé comme photomètre », Luigi Valentino Brugnatelli (1761-1818), professeur de chimie de l'université de Pavie⁹⁰ conteste la validité d'une méthode difficilement reproductible, en raison de l'instabilité même de la solution qu'il est impossible de préparer avec « la même quantité d'oxygène »⁹¹.

L'invention du citoyen de Genève n'en participe pas moins aux progrès d'une science du climat qui, depuis plusieurs années, a su organiser la collecte de nombreuses données atmosphériques. Les républiques alpines se sont déjà dotée d'un réseau d'observateurs réguliers. Fondée en 1780, la Société météorologique palatine de Mannheim dispose également d'un réseau de trente-neuf stations. La France n'est pas en reste : à l'initiative de la Société royale de médecine, elle dispose d'une organisation de près de 150 correspondants météorologistes dont les relevés périodiques sont compilés, tabulés par le père Louis Cotte (1740-1815) oratorien et *associé régnicole* de cette compagnie⁹². Les mesures ne se limitent pas à celles de la pression, de la température, du volume des précipitations et de l'humidité de l'air que l'on sait désormais évaluer avec l'hygromètre à cheveu de De Saussure ou celui à fanon de baleine

donne David Brewster, *A treatise on new philosophical instruments, for various purposes in the arts and sciences. With experiments on light and colours.*, Edinburgh, John Murray and William Blackwood, 1813. Une réflexion sur ce sujet est aussi engagée par Daniel Rothbarts, *Philosophical instruments Minds and Tools at Work*, University of Illinois Press, 2007.

88. Horace Bénédicte de Saussure, « Effets chimiques de la lumière sur une haute montagne comparés avec ceux qu'on observe dans les plaines », *Mémoires de l'Académie royale des sciences, années 1788-1789*, Turin, Jean-Michel Briolo, 1790, tome 4, p. 441-453.

89. L'action de l'acide muriatique en solution sur un oxyde métallique, comme l'oxyde de manganèse, forme ce que Lavoisier et Berthollet ont appelé *acide muriatique oxygéné*. À tort, Lavoisier faisait de l'oxygène le *principe acide*. La décomposition de l'acide muriatique par l'oxyde de manganèse conduit en fait à la formation de *chlore*, identifié comme un corps simple par Joseph-Louis Gay-Lussac et Louis Jacques Thénard (1777-1857) en France et par Humphry Davy (1778-1829) en Angleterre. La dissolution du dichlore dans l'eau conduit à l'acide hypochloreux assez instable. L'action de la lumière favorise sa décomposition par une réaction produisant du dioxygène.

90. L. V. Brugnatelli, *Annales de Chimie*, janvier 1792, tome 64, p. 64.

91. Voir aussi Monge, Cassini, Berthollon, Hassenfratz, *Encyclopédie méthodique, Physique*, tome 4, Paris, Mme Veuve Agasse, 1822, p. 292.

92. Voir notamment Michel Beaurepaire, « L'observation de l'atmosphère sous l'égide de la Société royale de médecine », in *L'observation thermique de l'atmosphère en France et dans les pays proches*, thèse, Paris, 1994, p. 271-344. Les moyennes couvrant la période entre les années 1778 et 1793 ont été publiées dans la revue *Histoire et mémoires de la Société royale de médecine*

de Jean André de Luc (1727-1817)⁹³. L'éventail des données atmosphériques s'étoffe de paramètres photométriques. S'éveille ainsi une photométrie « atmosphérique » qui se consacre à mesurer l'éclat du Soleil en fonction de sa course, celui de la Lune et l'intensité lumineuse de l'atmosphère, sa transparence, sa « diaphanéité », toute mesure demandant de nouveaux instruments. Il s'agit, en cette fin du siècle des Lumières, de passer « du monde de l'à peu près, à l'univers de la précision »⁹⁴, de débarrasser les observations, les « meteoromantische beobachtungen », selon le mot de Wilhelm August Lampadius (1772-1842) de leur côté qualitatif, littéraire et subjectif pour les quantifier par des valeurs numériques, précises et *comparables*. D'où l'idée de munir les instruments d'une échelle graduée, si possible centésimale pour la simplicité de la lecture, définie entre deux points fixes dont la détermination demandera encore d'autres efforts. Le cyanomètre de De Saussure, qui sera utilisé par Alexander von Humboldt (1769-1859) dans ses explorations répond à cet objectif et caractérise ainsi, *quantitativement*, le bleu du ciel à l'aide d'un nuancier circulaire de 53 degrés obtenus en *désaturant* un bleu pur vers le blanc et vers le noir⁹⁵. Dans ses *Réflexions sur l'atmosphérologie*⁹⁶, Lampadius énonce les règles à suivre pour pratiquer l'art des mesures météorologiques. Le professeur de chimie de Freiberg propose aussi un photomètre d'un genre nouveau, muni d'une échelle centésimale entre deux points fixes. La lumière est observée à travers un tube creux et l'observateur interpose sur le chemin du faisceau lumineux un nombre variable de disques d'égale épaisseur, taillés dans de la corne semi-transparente, jusqu'à ce que la lumière soit totalement occultée. L'instrument est étalonné en attribuant l'indice 100 à l'épaisseur de corne qui occulte la lumière produite par la combustion du phosphore dans le gaz oxygène (l'indice zéro correspondant à l'obscurité totale). Lampadius fournit dans son ouvrage les résultats de ses propres observations photométriques, réalisées pendant l'année 1814 : clarté de l'atmosphère, du disque solaire et de la Lune⁹⁷. L'instrument suscite l'intérêt de Johann Kaspar Horner (1774-1834), astronome suisse qui en propose une amélioration

93. Lire à ce sujet Margarida Archinard, « L'apport genevois à l'hygrométrie », *Gesnerus : Revue suisse de l'histoire de la médecine et des sciences naturelles*, 1977, vol. 34, p. 242-262.

94. Alexandre Koyré, « Étude d'histoire de la pensée philosophique », Paris, Gallimard, 1997, p.342.

95. H. B. de Saussure, « Description d'un cyanomètre ou d'un appareil destiné à mesurer l'intensité de la couleur bleue du ciel », *Mémoires de l'Académie royale des sciences, années 1788-1789*, Turin, Jean-Michel Briolo, 1790, tome 4, p. 409-424.

96. W. A. Lampadius, *Beyträge zur Atmosphärologie*, Freiberg, Graz und Gerlach, 1817.

97. W. A. Lampadius, [Lam17], p. 164-187. Voir aussi *Archives des découvertes et des inventions nouvelles, pendant l'année 1816*, volume neuvième, Paris, Treuttel et Würtz, 1817, p. 100 et *Bibliothèque universelle de Genève*, 1816, tome 1, p. 62-63.

en remplaçant la corne des disques par du papier transparent⁹⁸ et, par la suite, par des lames de mica ou « verre de Moscovie ». Horner édite aussi les mesures de son propre instrument : les valeurs relatives de la luminosité du ciel exprimées en *couches de papier* ou en degrés du photomètre⁹⁹. Il faut

Ciel bleu au zénith.	{	1 mars. 45° photom.
		11 46
		26 43
		2 avril. 56
		3 56
		5 45½
Ciel à l'horizon au méridien.	{	2 mars. 63° photom.
		11 73 au-dessous du soleil
		2 avril. 59
		3 59
Ciel couvert.	{	26 fév. 59° photom.
		27 58
		28 54—pluie.
		4 mars. 52—avant la pluie.
		— 55
		24 49½—pluie et neige.
		37 50
		10 avril. 49
		14 50

fig. 2.2 – Luminosité du ciel mesurée par l'appareil de Horner. D'après J. K. Horner, *Bibliothèque universelle*, Genève, 1817.

rappeler que le principe de l'instrument de Lampadius, modifié par Horner avait été énoncé plus d'un siècle plus tôt par le père François Marie (supra p. 27), prédicateur capucin de la Province de Paris, dans un essai publié en 1700¹⁰⁰. Ce dernier y présente ainsi son invention :

C'est alors que les degrés de la lumière se pourront compter par le nombre de ces verres, qui en feront l'affoiblissement & la diminution ; de sorte que comptant depuis ce premier verre du côté de l'œil jusqu'au dernier du côté du luminaire, ou du principe de la lumière, le nombre de ces verres, pourvû qu'ils soient tous d'une égale épaisseur & transparence, se pourra prendre pour autant de degrés, qui marqueront ceux de la lumière.

98. Un papier chinois « très délié » enduit d'un vernis gras sur les deux côtés.

99. J. K. Horner, « Description d'un photomètre », *Bibliothèque universelle*, Genève, 1817, tome 6, p. 162-166.

100. François Marie, *Nouvelle découverte sur la lumière pour la mesurer & en comparer les degrés*, Paris, Louis Sevestre, 1700.

François Marie n'ira pas jusqu'à la fabrication de son *lucimètre*, se contentant de soumettre l'idée de son invention à l'Académie royale des sciences, à charge aux *sçavans* de la réaliser et de la mettre en œuvre. La *compagnie des sçavans* ne répondra pas à sa demande. Il est vrai que le propos du père Marie n'est pas exempt de reproches puisqu'il suppose une simple relation de proportionnalité entre l'épaisseur du verre traversé et l'intensité de la source lumineuse, ce qui est manifestement faux. Comme l'a montré Bouguer dans sa théorie de la transparence, exposée dans son essai d'optique sur la gradation de la lumière, si l'épaisseur du milieu diaphane traversée augmente de façon arithmétique, la lumière transmise diminue de façon géométrique (supra p. 37). Il n'est pas certain que ni Lampadius ni Horner n'aient lu l'essai du père Marie qu'ils ne mentionnent pas dans leurs publications. Ils n'en commettent pas moins la même erreur puisque chaque degré de leur photomètre correspond à l'épaisseur d'un disque translucide. On peut croire

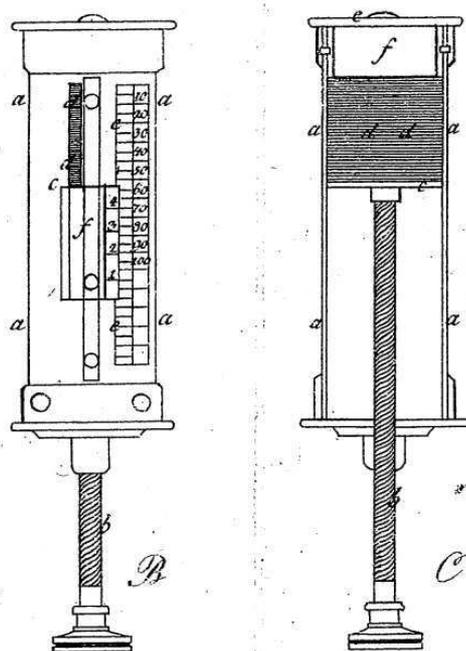


fig. 2.3 – Le vernier gradué du photomètre de Lampadius et le système de serrage des disques translucides. D'après W. A. Lampadius, *Beiträge zur Atmosphärologie*, 1817.

que préoccupé par les mesures météorologiques, Lampadius se soit laissé emporter par l'idée séduisante de définir une échelle photométrique centésimale, à l'image de l'échelle thermométrique, définie entre deux points fixes correspondant physiquement pour le zéro, à l'obscurité et pour le degré 100,

à la lumière émise par la combustion du phosphore dans l'oxygène, lumière qui, pour l'époque, pouvait être perçue comme l'une des plus éblouissantes qui fût. Le photomètre de Lampadius permet ainsi un repérage de l'intensité d'une source mais il se révèle incapable d'effectuer la comparaison exacte de deux sources lumineuses. Néanmoins, la méthode du coin, ou *wedge*, qui consiste à faire traverser par la lumière des épaisseurs plus ou moins grandes d'un milieu absorbant dont on connaît le coefficient de transmission est un procédé de gradation de la lumière utilisable en photométrie, à condition de déterminer au préalable l'absorption de la lumière pour chaque épaisseur du milieu. Il sera utilisé plus tardivement dans le photomètre de Robert Henry Sabine (1837-1884)¹⁰¹ perfectionné par l'astronome Edmund Johnson Spitta (1853- 1921)¹⁰².

Le photomètre inventé dans ces mêmes années par le Suisse Jean-Samuel Nicod-Delom utilise l'acuité visuelle de l'observateur. Ce dernier est amené à distinguer à travers l'ocillon de l'instrument un motif unicolore, éclairé par la lumière de l'atmosphère, diaphragmée par une fente rectangulaire, pratiquée sur le côté de l'appareil. La largeur de la fente est censée fournir une évaluation de la lumière atmosphérique. Ici encore, la relation entre la *grandeur mesurée*, la largeur de la fente, et la *mesurande*, l'intensité lumineuse, n'est pas formulée dans la description de l'appareil rendue par les rédacteurs de la Bibliothèque universelle¹⁰³. Le photomètre de Nicod-Delom ne permet donc que le repérage des différents niveaux de la lumière atmosphérique, mais pour l'inventeur de Vevey, occupé aussi à des observations météorologiques, journalières, il s'agit seulement d'indiquer « d'une manière un peu précise le degré de clarté du jour (...) et de ne pas être borné à dire *clair*, *nuages*, *couvert* ; (...) Il a eu en même temps en vue de rendre l'instrument comparable. » Quant au *diaphanomètre* de De Saussure, instrument censé mesurer la transparence de l'air, il utilise également l'acuité visuelle de l'œil amené à discerner des motifs vus sous un angle de plus en plus petit, en l'occurrence des cercles noirs dont le diamètre diminue selon une certaine proportion. Si l'air est parfaitement transparent, la distance où le motif reste discernable doit décroître dans la même proportion. Une décroissance plus rapide té-

101. Robert Sabine, « On a Wedge-and Diaphragm Photometer », *Philosophical Magazine and Journal of Science*, London, Taylor and Francis, 1883, vol. 15, ser. 5, p. 22-28.

102. Edmund Johnson Spitta, « On a Compound Wedge Photometer », *Proceedings of the Royal Society*, London, 1889, vol. 47, p. 15-18. Voir aussi Palaz, *Traité de photométrie industrielle*, Paris, Georges Carré, 1892, p. 58-59.

103. J.S. Nicod-Delom, « Description d'un photomètre nouveau communiquée aux Rédacteurs par Mr. Nicod-Delom, de Vevey, Inventeur de l'instrument », *Bibliothèque britannique*, Genève, Imprimerie de la Bibliothèque britannique, 1816, tome 1, p. 255-261.

moigne d'une diminution de l'éclairage et donc d'un défaut de transparence de l'air¹⁰⁴.

Le 20 décembre 1799, le physicien Écossais John Leslie (1766-1832) adresse au citoyen Guyton (Louis-Bernard Guyton de Morveau, 1737-1816) le manuscrit d'un article en vue de sa publication dans les *Annales de chimie*. Le même article sera simultanément adressé à William Nicholson (1753-1815) en vue de sa parution dans le *Journal of Natural Philosophy Chemistry and the Arts*. Cette étude fournit la « description d'un hygromètre et d'un photomètre », deux instruments similaires dans leur forme qui, selon ce qu'en dit avec modestie leur créateur, « ont été portés à cette simplicité de construction qui ne laisse rien à désirer ». Dans l'esprit de Leslie, les instruments doivent être construits selon des principes physiques clairement établis :

mais leur développement, sur-tout par rapport à l'objet de ces instrumens, exige de nouvelles et importantes recherches d'après lesquelles ils puissent être soumis à des calculs plus exacts.

Priorité donc à la physique et à la géométrie (les mathématiques) pour la mesure, ce qui l'autorise à émettre ce jugement :

Connoissant les imperfections, sinon l'inutilité absolue des instrumens ordinaires, je fus bientôt convaincu que cela venoit non seulement de suppositions arbitraires, mais aussi de fausses hypothèses. J'abandonnai dès-lors les hydrosopes connus, et je pensai à chercher d'autres principes, d'après lesquels on pût obtenir cette précision géométrique si précieuse dans les sciences.¹⁰⁵

S'agit-il d'une critique des hygromètres de De Luc et de De Saussure qui utilisent les propriétés de certaines substances animales, sensibles à l'humidité, en dépit de tout le soin et de toute la précision suisse apportés à leur fabrication par l'artisan Jacques Paul de Genève ? La critique ne semble pas avoir échappée aux rédacteurs genevois de la Bibliothèque britannique.¹⁰⁶

L'hygromètre de Leslie qui peut être transformé en photomètre est fondé sur un phénomène physique déjà bien étudié : la baisse de température causée par l'évaporation de l'eau en contact avec l'air environnant, jusqu'à ce que

104. H. B. de Saussure, « Description d'un *diaphanomètre* ou d'un appareil destiné à mesurer la transparence de l'air », *Mémoires de l'Académie royale des sciences, années 1788-1789*, Turin, Jean-Michel Briolo, 1790, tome 4, p. 425-440.

105. John Leslie, « Description d'un hygromètre et d'un photomètre », *Annales de chimie, ou Recueil de mémoires, concernant la chimie et les arts qui en dépendent.*, Paris, 1800, vol. 35, p. 3-22.

106. Voir *Bibliothèque britannique*, 1800, tome 14, note de la page 5.

l'air soit saturé en vapeur d'eau. « Le froid produit par l'évaporation indiquera exactement le degré de sécheresse de l'air, où sa distance du terme de saturation. » L'instrument est formé de deux boules creuses, remplies d'air communiquant entre elles par un tube de verre coudé contenant, sur la plus grande portion, une liqueur colorée. L'une des boules est entourée d'une enveloppe humide. Son refroidissement, causé par l'évaporation de l'eau qui imbibe l'enveloppe, se traduit par le déplacement du liquide devant une échelle graduée.

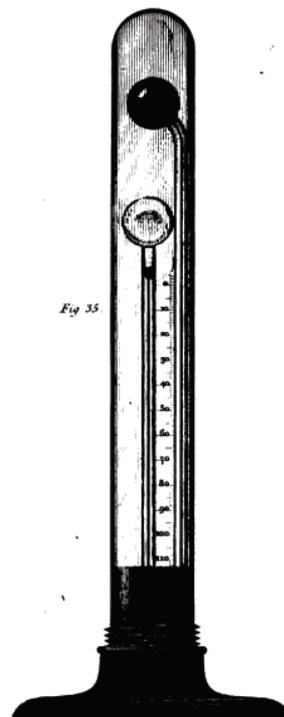


fig. 2.4 – Photomètre de Leslie.

Tiré de John Leslie, *An experimental enquiry into the nature of heat*, Edinburgh, 1804, planche VI, p. 424.

La transformation en photomètre se fait simplement en noircissant l'une des boules, l'autre étant faite « d'un verre très transparent et exempt de taches ». Leslie consacre à son photomètre le chapitre XIX de son ouvrage : *An experimental inquiry into the nature and the propagation of heat*, publié en 1804. Il part de l'idée que chaleur et lumière sont deux états d'une même et unique substance : l'absorption de la lumière par un corps se traduit par une production de chaleur et une élévation de température mesurable par une « dilatation proportionnelle ».

*(...) the intensity of the luminous stream would then be always expressed by the permanent elevation of temperature which it must occasion. Such are the principles on which I have composed the photometer.*¹⁰⁷

La boule noire du photomètre absorbe de manière continue l'énergie du rayonnement et la transforme en chaleur : la température de la boule augmente de façon transitoire jusqu'à l'obtention d'un régime permanent, correspondant à la température d'équilibre. Leslie avance que « la chaleur accumulée doit à la fin être emportée par l'air environnant » et pour éviter les fluctuations que le vent et les courants d'air pourraient infliger à la mesure, propose de placer le corps sensible de l'instrument sous une enveloppe d'un verre parfaitement transparent. Cette justification qui explique la dissipation de la chaleur accumulée par les seuls courants de convection oublie le rayonnement du corps sensible, rayonnement d'autant plus important que le corps est noir. Si Leslie s'attache à expliquer la physique impliquée dans le fonctionnement de son appareil, la question de son étalonnage reste en suspens, comme l'exprime une phrase qui ne laisse pas d'interroger : « Les degrés sont les mêmes que pour l'hygromètre. L'échelle n'en doit pas contenir plus de 200, et pas moins de 100. » La métrique de l'échelle n'est pas définie et Leslie ne s'attache pas à exprimer les degrés de celle-ci à partir d'une lumière de référence ou à partir de points fixes. Leslie n'en affiche pas moins ses ambitions : muni de son thermomètre différentiel, de son hygromètre et de son photomètre, il compte bien mesurer dans l'atmosphère, la chaleur résultant du rayonnement solaire, son transport à la surface du globe. Influencé par James Hutton (1726-1797) et sa *Théorie de la pluie*, il s'intéresse aussi à la relation entre chaleur et humidité et l'affinité (« the mutual affection ») entre l'air atmosphérique et cette dernière. Il s'agit d'établir, ainsi l'annonce-t-il, *les fondements de son système pour la météorologie*. Les mesures de Leslie concernent le rayonnement solaire et la lumière de l'atmosphère en différents lieux, aux différentes heures du jour, en différentes saisons. L'instrument fournit également une comparaison de la lumière solaire avec la lumière de différentes sources artificielles. La comparaison avec celle d'une bougie fournit les résultats suivants : placé à une distance de 2 pouces de la flamme de la bougie, l'appareil affiche 6 degrés. Il faut reculer la chandelle jusqu'à une distance de 4 pieds pour obtenir la même sensation visuelle que la lumière solaire, laquelle provoque une déviation de 125 degrés sur le photomètre. À cette distance, l'action de la bougie sur le photomètre se ramène à $\frac{1}{96}$. De ces pointés, Leslie peut déduire que l'intensité de la lumière solaire est $96 \times 125 = 12000$ fois plus intense

107. John Leslie, *An experimental inquiry into the nature and the propagation of heat*, Edinburgh, 1804, p. 403-404.

que celle de la bougie¹⁰⁸. Ce résultat doit être rapproché de celui obtenu par Bouguer, lors de sa célèbre expérience du 22 septembre 1725, pour comparer la lumière du Soleil à celle de la pleine Lune. Sur l'écran d'observation, l'éclairage solaire affaibli 11664 fois par une lentille divergente était équivalent à celui d'une bougie placée à 16 pouces.

Selon le professeur d'Edinburgh, la seule méthode légitime de mesure de la lumière doit reposer sur un *principe* physique, en l'occurrence, la chaleur qui accompagne la conversion de la lumière lorsque les atomes de lumière se combinent à l'air contenu dans les boules du photomètre :

*As heat is measured by the expansion it occasions, so light is determined by the intensity of the heat which, in every supposition, invariably accompanies it. What other mode, after all, could be imagined for detecting the presence of light? How can an unknown quantity be expounded, but in terms of one already known?*¹⁰⁹

Propos d'autant plus étonnant que, dans le procédé mis en œuvre par l'Écos-sais pour comparer la lumière du Soleil à celle d'une bougie, l'un des pointés photométriques est effectué par la méthode visuelle de Bouguer. Mais, au delà de cette contradiction, le principe sur lequel repose l'appareil de Leslie est source de mesures biaisées : l'instrument absorbe forcément l'intégralité du rayonnement émis par la source, dans sa direction et, par voie de conséquence, les rayons calorifiques obscurs « qui se trouvent mêlés aux différentes lumières. ». L'instrument, et c'est un reproche qui sera formulé à son encontre par plusieurs auteurs, s'apparente d'avantage à un actinomètre ou à un radiomètre qu'à un véritable photomètre et son usage est à proscrire pour la comparaison des pouvoirs éclairants.

Loin d'offrir une précision, une reproductibilité et une répétabilité suffisantes, les tentatives précoces, menées au tournant du XVIII^e et du XIX^e siècles ont échoué à doter la photométrie du *philosophical instrument* pourvu d'une échelle photométrique centésimale, munie d'un zéro indiquant l'obscurité totale et d'un point 100 indiquant le degré d'intensité maximum. Les instruments proposés ont ainsi davantage servi à enrichir la collection des cabinets de physique de quelques amateurs éclairés qu'à participer aux progrès d'une instrumentation photométrique qui reste fondée sur la loi des distances et le principe de l'égalisation visuelle des sources ou des ombres portées. Si

108. John Leslie, *A short Account of Experiments and Instruments depending on the relations on Air to Heat and Moisture*, Edinburgh, 1813, p. 61

109. John Leslie, *Treatises on Various Subjects of Natural and Chemical Philosophy*, Edinburgh, Adam and Charles Black, 1828, p. 313.

cette méthode est déjà ancienne, elle reste robuste et d'une précision très suffisante entre les mains d'observateurs expérimentés. C'est pourquoi elle est non seulement utilisée par Fresnel et Arago pour expertiser les luminaires des phares mais se trouvera aussi préconisée par les ingénieurs de la jeune industrie gazière, confrontés à la mesure du pouvoir éclairant des becs lumineux, alimentés en gaz d'huile et en gaz de houille.

Parallèlement aux débuts lents et difficiles de la photométrie, se développe en France une théorie de la chaleur, appuyée sur les travaux de Joseph Fourier et les expériences rigoureuses de Pierre Louis Dulong et d'Alexis Thérèse Petit (1791-1820). Pourquoi, dès lors, ne pas appliquer ce nouveau formalisme aux transferts de chaleur dans l'atmosphère, les océans et la croûte terrestre et mettre en place les fondements d'une science du climat ? Cette ambition, servie par plusieurs dont John Frederic Daniell (1790-1845) en Angleterre ou le savant voyageur Alexandre de Humboldt¹¹⁰ suppose un maillage du globe avec des stations d'observation convenablement situées et équipées, chargées de recueillir les valeurs de paramètres climatiques pertinents. Mais deux décennies plus tard, les climatologues et les météorologues sont mieux armés qu'aux premiers moments du siècle : baromètres et thermomètres offrent des résolutions et des précisions très satisfaisantes, à tel point que Dulong évoque des erreurs de un demi centième de degré ! Quant aux mesures d'hygrométrie, elles font l'objet d'études détaillées¹¹¹ et profitent de nouvelles améliorations pour l'hygromètre à évaporation et d'innovations telle l'hygromètre à point de rosée (*dew point*) de Daniell. L'autre question importante dans cette science nouvelle est la détermination du bilan radiatif de la Terre : la mesure du rayonnement solaire reçu, du rayonnement diffus de l'atmosphère et de celui émis par la Terre. Ces mesures demandent des méthodes précises et adaptées dont l'ensemble constitue ce que John Herschel a dénommé l'« actinométrie ». Le Français Claude Pouillet (1790-1868) est le premier qui met en œuvre ses instruments pour déterminer la *constante solaire*, c'est à dire la puissance du rayonnement solaire, reçue par $1m^2$ de surface terrestre, exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. La valeur obtenue par Pouillet, $1228W/m^2$, se montre assez proche de la valeur admise aujourd'hui, d'environ $1368W/m^2$ ¹¹². L'étude du rayonnement

110. Alexander von Humboldt, « Des lignes isothermes et de la distribution de la chaleur sur le globe », *Mémoires de physique et de chimie de la Société d'Arcueil*, Paris, Mme Ve H. Perronneau, 1817, vol. 3, p. 462-602.

111. J. F. Daniell, *Elements of Meteorology, Meteorological Essays, An essay upon hygrometry and the construction and use of a new hygrometer*, third Edition, London, John W. Parker, 1845, vol.2, p. 3-101.

112. Sur l'œuvre de Claude Pouillet, consulter Francis Baubois, « Le Soleil comme laboratoire des pratiques scientifiques », thèse, Paris, 2014, p. 45-80.

solaire, de son influence sur l'atmosphère est donc devenue l'affaire de la physique, conformément aux souhaits de Leslie, physique *pure* qui ne saurait laisser ses mesures à des capteurs physiologiques et qui laisse à la photométrie, entendons-nous bien, « visuelle », le soin de caractériser le pouvoir éclairant de l'astre.

Dépourvue d'un étalon de lumière, privée du *philosophical instrument* nécessaire à des mesures affranchies des sens de l'observateur, confrontée à la comparaison de flammes changeantes, la photométrie, comme l'observe François Arago dans sa déclaration de 1833, est restée à l'état de ses origines. Ce constat a certainement motivé les efforts du physicien français et son désir d'appliquer à la photométrie ses dernières découvertes sur la lumière polarisée.

2.6 François Arago et le photomètre à polarisation

La vie et l'œuvre de François Arago ont été largement étudiées par de nombreux auteurs¹¹³. Mais c'est sans doute le natif d'Estagel en Roussillon qui a relaté le mieux dans son *Histoire de ma jeunesse*, ouvrage posthume, fourmillant d'anecdotes savoureuses, les péripéties d'une carrière éclair et aventureuse qui l'ont propulsé à l'âge de dix-neuf ans au poste de secrétaire-bibliothécaire du Bureau des longitudes, puis à son élection à la Première classe de l'Institut¹¹⁴ alors qu'il n'est âgé que de vingt-trois ans. L'appui de Laplace n'est certainement pas étranger à ces promotions. Comme le signale Bruno Belhoste :

Les polytechniciens sont en force à l'Académie. Dès le début du siècle, Laplace fait élire des jeunes chercheurs sortis dans les premières promotions. Le premier polytechnicien est Biot, élève de la promotion 1794, élu dès 1803 dans la section de géométrie, suivi de Gay-Lussac, (promo 1797) en 1806 dans la section de chimie...¹¹⁵.

113. On pourra notamment consulter les ouvrages suivants, référencés dans la bibliographie : Jules Jamin (1818-1886), *Éloge historique de François Arago* ; Wilfrid de Fonvielle (1826-1914), *la jeunesse d'un grand savant républicain* ; Maurice Daumas (1910-1984), *Arago, la jeunesse de la science* ; James Lequeux, *François Arago, un savant généreux*.

114. L'Académie des sciences sera rétablie par l'ordonnance royale du 21 mars 1816.

115. Bruno Belhoste, « Les polytechniciens dans la vie intellectuelle parisienne au XIX^e siècle », in Bruno Belhoste, Francine Masson, Antoine Picon, *Le Paris des polytechniciens : des ingénieurs dans la ville (1794-1994)*, Action artistique de la Ville de Paris, 1994, p. 53-59.

Élève de la promotion 1803, Arago sera, quant à lui, élu à l'Académie, dans la section d'astronomie, en 1809. Le jeune astronome est juste de retour en France, après son odyssée en Catalogne et en Méditerranée débutée en 1806. Accompagné de Biot, Arago devait terminer les travaux de triangulation, interrompu par la mort de Pierre Méchain (1744-1804) en 1804, en vue de prolonger la méridienne de Paris jusqu'aux Baléares. Biot devait se charger plus spécialement des mesures gravimétriques¹¹⁶ avec un pendule de précision. La carrière d'Arago, qui occupe tout le premier XIX^e siècle, va le conduire à des positions très importantes au sein de la communauté scientifique : Secrétaire perpétuel de l'Académie (autrement dit, maître des débats et des publications) en 1830 puis Directeur des observations à l'Observatoire de Paris (1834). Mais c'est aussi en 1830 qu'Arago est élu conseiller général de la Seine et peut siéger ainsi au Conseil de Paris, puis l'année suivante à la Chambre des députés, comme député des Pyrénées orientales. Il peut désormais agir à la fois en tant qu'homme politique et comme expert scientifique. Il siège dans de nombreuses commissions réunies, par exemple, autour de l'alimentation en eau potable de la population parisienne et de la distribution du gaz d'éclairage (infra, 3). Le député sait aussi s'exprimer sur la question de l'enseignement secondaire et dénoncer la place insuffisante, occupée dans les programmes par les sciences, face à l'hégémonie des humanités classiques. À la Chambre, dans le camp de ceux que Bruno Belhoste appelle les « industrialistes »¹¹⁷, Arago n'est pas le moins virulent qui s'oppose à Alphonse de Lamartine (1790-1869) lors du débat sur le projet de 1836 relatif à la constitution des Collèges communaux (Chambre des députés, séance du 23 mars 1837) :

Il y a chez nous un grand nombre d'autorités universitaires qui ont peu de goût, peu de bienveillance pour les études scientifiques... Il a été dit ici même qu'elles étaient un métier de manoeuvre.... Ce n'est pas, en effet, avec de belles paroles qu'on fait du sucre de betterave ; ce n'est pas avec des alexandrins qu'on extrait la soude du sel marin...¹¹⁸

La réponse de Lamartine à Arago est non moins savoureuse :

Et enfin cette éducation spéciale et industrielle que vous deman-

116. Mesure de la gravité, c'est à dire de l'accélération de la pesanteur en un lieu.

117. Bruno Belhoste, « Les caractères généraux de l'enseignement secondaire scientifique : de la fin de l'Ancien Régime à la Première Guerre mondiale », *Histoire de l'éducation*, No. 41, « Histoire des enseignements scientifiques » (janvier 1989), p. 15

118. Arago cité par Octave Gréard, *Éducation et instruction, enseignement secondaire II*, deuxième édition, Paris, Hachette, 1889, p. 61-62.

dez pour les Collèges communaux doit-elle exclure l'étude des langues que vous appelez mortes et que moi j'appellerai immortelles ?¹¹⁹

La diffusion des savoirs scientifiques est une préoccupation majeure chez Arago dont le cours d'Astronomie populaire rencontre le plus vif succès. C'est aussi animé de cette ambition qu'Arago présente à l'Académie ainsi qu'à la Chambre des députés les procédés photographiques de Joseph Niépce (1765-1833) et de Louis Daguerre (1787-1851), afin d'offrir au monde cette invention. En 1835, son Secrétaire perpétuel décide la publication des travaux de l'Académie des sciences. Le public pourra lire dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* les résultats de la recherche en France mais aussi en partie à l'étranger. Cette initiative constitue un exemple de « science ouverte », près de deux siècles avant la naissance du terme et Arago aurait pu prononcer ces mots : « La France s'engage pour que les résultats de la recherche scientifique soient ouverts à tous, chercheurs, entreprises et citoyens, sans entrave, sans délai, sans paiement »¹²⁰. Malheureusement Arago a peu publié dans les Comptes rendus, ce qui rend difficile l'établissement d'une chronologie précise de ses travaux et de ses expériences. Les travaux d'Arago, seront rassemblés par son éditeur Jean-Augustin Barral (1819-1884) sous formes de mémoires et de notices, dictés pour la plupart à la fin de sa vie et dont certains seront lus en séance devant l'Académie. C'est le cas notamment des *Mémoires sur la photométrie*¹²¹ qui méritent ici une attention particulière dans la mesure où, mis à part l'important travail de James Lequeux à ce sujet, ces travaux ont été peu étudiés par les historiens.

Appelé à la commission des phares, après la mort de Malus en février 1812, le jeune académicien sera amené à épauler Augustin Fresnel, de deux ans son cadet, dans ses expériences sur les becs lumineux et les équipements des phares. Arago ne pouvait, a priori, qu'être intéressé par la mesure de la lumière. Mais c'est sans doute ses observations commencées dès 1805 à l'Observatoire de Paris, sous la direction d'Alexis Bouvard (1767-1843) et poursuivies pendant presque toute sa carrière, qui l'ont conduit à s'intéresser à l'amélioration des méthodes de la photométrie astronomique.

À l'époque d'Arago, l'Observatoire de Paris est placé sous la tutelle du Bureau des longitudes, organisme chargé de la détermination des longitudes en particulier par l'observation de divers corps célestes. Ainsi des satellites

119. Lamartine cité par Octave Gréard, *ibid.*, p. 64.

120. Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, Deuxième plan national pour la science ouverte, juillet 2021.

121. Sur la publication des œuvres complètes d'Arago, voir James Lequeux, [Leq08], p. 68-70.

galiléens de Jupiter, dont les éclipses sont l'objet de toutes les attentions. Le Bureau des longitudes publie sans interruption les tables de leurs immersions et de leurs émergences pour le méridien de Paris¹²². La différence entre le temps d'une émergence sur le méridien de Paris et le temps où est observée la même émergence en un autre lieu fournira, après « réduction du Temps en parties de l'Équateur », la longitude du lieu par rapport au méridien de Paris. Ces données sont donc stratégiques et participent à l'augmentation des connaissances en géographie, bien que leur utilisation pour la détermination des longitudes en mer soit pénalisée par la difficulté de l'observation des phénomènes avec une lunette d'approche embarquée¹²³. Cependant les « inégalités optiques »¹²⁴ touchant aux éclipses des satellites de Jupiter remettent en cause leurs éphémérides. On peut supposer que la réduction de ces inégalités signalées de longue date par Grandjean de Fouchy¹²⁵ et étudiées par Bailly¹²⁶ ait pu constituer pour Arago un sujet de préoccupation, ainsi que le laisse supposer son évocation dans le premier mémoire sur la photométrie¹²⁷ et l'un de ces perfectionnements nécessaires que les progrès de la photométrie pouvait apporter aux observations.

Il me semblait depuis longtemps qu'il fallait essayer de combler cette lacune de l'optique [l'absence de progrès de la photométrie],

122. Les temps où les satellites entrent et sortent de l'ombre de Jupiter pendant leur éclipse. La signification précise de ces termes est donnée dans la *Connaissance des temps*, année 1726, p. 152.

123. Sur ce sujet, lire Guy Boistel, *L'astronomie nautique au XVIII^e siècle en France : tables de la Lune et longitudes en mer*, Thèse, Université de Nantes, 2001.

124. En astronomie, les inégalités optiques représentent les différences entre les mouvements apparents des astres, vus de la Terre et leurs mouvements réels.

125. Grandjean de Fouchy avait déjà indiqué les « inégalités optiques » propres aux éclipses des satellites jupitériens : on peut les comprendre comme la différence de temps entre la disparition réelle et la disparition apparente, observée de la Terre, du satellite qui pénètre dans le cône d'ombre de Jupiter. En d'autres termes, au moment où, de la Terre, l'éclipse du satellite est vue comme totale, une partie du disque de ce dernier n'est pas encore éclipcée. L'immersion « retardera » et inversement l'émergence « avancera ». Plus le satellite est éclairé et plus le temps de l'immersion apparente se rapproche du temps de l'immersion vraie. Or l'intensité de la lumière perçue sur Terre est d'autant plus grande que Jupiter est plus proche du Soleil et la Terre plus proche de Jupiter et elle varie en raison inverse des carrés de ces deux distances. Les temps des éclipses se produisant près de la conjonction de Jupiter avec le Soleil doivent donc différer sensiblement de ceux des éclipses proches de l'opposition.

126. L'astronome Bailly avait proposé une solution à cette question en diaphragmant la lumière émise par le satellite, en oubliant, comme le fait remarquer Arago, la diffraction qui étale les bords de l'image. Lire Bailly, « Mémoire sur les inégalités de la lumière des satellites de Jupiter », *Mémoires de l'Académie royale des sciences*, Paris, 1771, p. 580-667.

127. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 156-158.

ne fût-ce qu'à raison des ressources multipliées que l'astronomie pourra puiser dans les méthodes photométriques, dès quelles auront acquis une précision suffisante.¹²⁸

Pourtant, comme le souligne James Lequeux¹²⁹, les publications consacrées à la photométrie s'inscrivent tardivement dans l'œuvre de l'académicien, même si elles y occupent une place non négligeable. Elles ont été rassemblées par Barral à la fin du tome 10 des œuvres complètes, publiées en 1858. Huit mémoires forment cet ensemble dont le premier a été lu à l'Académie des sciences, dans sa séance du 5 août 1833. Cet exposé introductif s'intitule : « Mémoire sur les moyens de résoudre la plupart des questions de photométrie que la découverte de la polarisation de la lumière a fait naître ». Pour Arago, la polarisation est un phénomène incontournable lors des mesures de la lumière et il attribue le manque de précision des estimations photométriques de Bouguer et de Lambert au fait que ces deux auteurs n'ont pas tenu compte de la polarisation acquise par les rayons lumineux, par suite des réflexions et réfractions subies à la surface ou à la traversée des milieux diaphanes, polarisation qui modifie les phénomènes d'intensité¹³⁰.

La polarisation peut être définie comme la rupture de la symétrie de révolution que présente un faisceau de lumière naturelle autour de son axe. En 1678, Huygens et peut-être avant lui Rasmus Bartholin (1625-1688) en 1669 (voir annexe B.1), avaient sans doute perçu ce changement de disposition ou de symétrie du rayon lumineux, causée par la traversée d'un cristal biréfringent de spath d'Islande. C'est Étienne-Louis Malus qui en 1808 a découvert qu'il peut être aussi provoqué par la réflexion de la lumière sur la surface des corps diaphanes, comme l'eau et le verre. En observant les rayons réfléchis à travers un cristal de carbonate de chaux qu'il fait tourner devant ses yeux, le jeune officier du génie remarque que l'intensité de l'une des deux images transmises par le cristal s'affaiblit tandis que l'intensité de l'autre se renforce ; le phénomène s'inverse après une rotation de 90°. Le même événement s'observe si les rayons réfléchis par une surface vitreuse subissent une seconde réflexion sur une autre glace non étamée, placée initialement parallèlement à la première et que l'on fait tourner autour de l'axe du rayon réfléchi¹³¹.

La première observation par Malus de la polarisation par réflexion vitreuse inaugure une active campagne d'expérimentations. Fraîchement revenu d'Afrique, Arago a vite rejoint son voisin de la rue d'Enfer¹³² sur le vaste

128. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 151.

129. James Lequeux, [Leq08], p. 295.

130. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 151-152.

131. Pour un rappel plus détaillé, se reporter à l'annexe B et à l'annexe C.

132. La maison de la rue d'Enfer où demeurait Malus était proche de l'Observatoire où

chantier ouvert par cette découverte. Poursuivant ses recherches, Malus a remarqué aussi la présence de lumière polarisée dans le faisceau transmis par une lame de verre à faces parallèles. La lumière réfractée est donc partiellement polarisée. L'exploitation de cette nouvelle trouvaille est l'occasion pour Arago de réaliser les premières mesures photométriques en lumière polarisée. Il a déjà été établi que « Le plan qui contient les pôles de la lumière réfractée est perpendiculaire au plan qui contient les pôles de la lumière réfléchie. Ces deux espèces de lumière sont donc polarisées à angles droits. »¹³³ Arago veut entreprendre la mesure, ou plutôt la comparaison des intensités de ces deux lumières. Il imagine le dispositif suivant : une lame de verre LD est placée

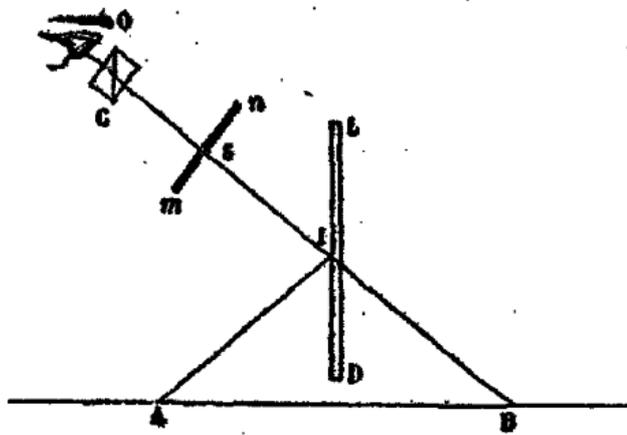


fig. 2.5 – Expérience d'Arago
 Comparaison des intensités des lumières polarisées par réflexion et par transmission.
 Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 323.

perpendiculairement à une feuille de papier blanc AB, amenée à renvoyer la lumière. Il est intéressant de noter ici que la source lumineuse, privilégiée par Arago est une surface AB d'une nuance uniforme, comme une « feuille de beau papier », uniformément éclairée « par une large portion du ciel » et qu'il a renoncé à utiliser les sources lumineuses à flamme de son temps, à l'intensité trop changeante :

Quant à moi, je le dis sans détour, j'aurais complètement renoncé aux recherches photométriques si je n'avais pas trouvé les moyens de me passer de l'intermédiaire incommode et incertain des chandelles, bougies ou lampes d'Argand.¹³⁴

Arago bénéficiait d'un logement. Voir M. Daumas, *Arago la jeunesse de la science*, Belin, 1984, p. 79.

133. F. Arago, *Œuvres*, tome 7, p. 322.

134. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 186.

L'œil placé en O et visant dans la direction OI reçoit la lumière du rayon issu de A, réfléchi par la lame LD et le rayon émis par B et transmis par LD. La lumière est diaphragmée par une ouverture S puis analysée par un prisme biréfringent C qui fournit deux images S_1 et S_2 . En faisant tourner le prisme, Arago constate l'égalité des intensités de ces deux images, quelle que soit l'orientation du prisme. Ceci montre que le faisceau émergent IO ne présente aucune trace de polarisation et que les lumières polarisées à angle droit qu'il renferme ont la même intensité, ce qui autorise Arago à exprimer la loi qui porte désormais son nom :

La quantité de lumière polarisée renfermée dans le faisceau que transmet un plan diaphane est exactement égale à la quantité de lumière polarisée à angles droits qui se trouve dans le faisceau réfléchi par le même plan.¹³⁵

Dans la notice qu'il consacre à la polarisation, Arago explique que ces dernières expériences ont été réalisées pendant l'année 1812, avant d'être publiées par Biot en 1814 à qui il les avait communiquées (Arago, *Œuvres*, tome 7, p. 379). Elles contiennent pourtant déjà certains principes qu'Arago utilisera dans sa photométrie : emprunter la lumière à un fond uniformément blanc, éclairé par la lumière d'un ciel couvert et dédoubler l'image visée par double réfraction¹³⁶.

Le moment où Arago entreprend ses recherches sur la lumière polarisée est particulièrement favorable : la physique est désormais dotée d'instruments de grande précision (en particulier pour la mesure des angles), sortis des ateliers des artistes les plus habiles : Jean-Nicolas Fortin (1750-1831), Henri Gambey (1787-1847) et Jean-Baptiste Soleil ; l'optique instrumentale connaît une progression impressionnante. Les travaux d'Aimé-Gabriel d'Arctiques (1773-1848) et de Robert-Aglaré Cauchoix (1776-1845) ont permis la fabrication en France d'objectifs achromatiques de qualité au moins équivalente à ceux réalisés par John Dollond (1706-1761) en Angleterre. L'expertise de ces composants indispensables aux observations astronomiques est confiée à Bouvard, le directeur de l'Observatoire et à Arago. C'est sans doute par ce biais qu'Arago fut amené à étudier la polarisation des rayons formant les anneaux colorés entre deux lentilles de verre et à faire devant la première classe de l'Institut, le 18 février 1811, une première communication *sur les couleurs des lames minces*¹³⁷. Le 11 août 1811 suivant, le savant astronome rend compte devant la Classe de ses observations « par un ciel serein » des

135. Arago, *Œuvres*, tome 7, p. 324.

136. Arago, « Deuxième mémoire sur la photométrie », *CRAS*, tome 30, 1850, p. 365-366.

137. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 1-35.

couleurs obtenues en analysant à l'aide d'un prisme de spath d'Islande la lumière transmise par une lame mince de mica¹³⁸. Les couleurs des deux images prismatiques, fournies par le cristal de spath sont complémentaires puisque dans les points où les deux images ne sont pas séparées par la double réfraction du cristal, le mélange des deux couleurs forme du blanc. Une rotation dans son plan de la lame de mica montre quatre positions à angle droit où les deux images prismatiques sont parfaitement blanches. Pareillement, une rotation du prisme de spath conduit au même phénomène. Arago remarque aussi que l'intensité des images dépend fortement de la lumière diffusée par l'atmosphère : de couleurs vives sous un ciel d'azur, les images perdent leur coloration par temps couvert. Arago n'est pas long à penser que l'intensité résulte de l'état de polarisation de la lumière incidente : il vérifie aisément que la lumière diffusée par un ciel bleu est fortement polarisée, ce qui n'est pas le cas de la lumière des *nuées*. « Profitant du peu de momens de loisir que [lui] laissent ses fonctions d'astronomie à l'Observatoire », Arago vient de découvrir la polarisation colorée, dite plus tard chromatique. Mais sans aller plus loin, il se contente d'une explication qualitative du phénomène qui fait appel à une action exercée par la lame de mica sur la lumière polarisée qu'il appelle « dépolarisation », action qui pèserait inégalement sur les différentes composantes colorées de la lumière incidente :

(...) si les propriétés de ces derniers rayons dépendent, comme on l'a supposé, de la disposition particulière des axes des molécules dont ils sont formés, il y aura, entre le rayon qui a été polarisé en se réfléchissant, ou en traversant un cristal doué de la double réfraction, et ce même rayon, à son émergence d'une lame de mica, cette différence, que dans le premier les axes des molécules de diverses couleurs sont parallèles, tandis que dans le second il existe des molécules de diverses teintes dont les axes ont des directions différentes.¹³⁹

Si l'expérimentateur théorise peu sur ses observations, il a évidemment remarqué la similitude du phénomène avec les anneaux colorés, observés par Newton dans la lame d'air formée entre un verre plat et celui convexe d'une lentille. Mais il a aussi noté une différence essentielle : l'influence de l'état de

138. F. Arago, « Sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur passage à travers certains corps diaphanes, et sur quelques autres nouveaux phénomènes d'optique », *Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut impérial de France*, Paris, 1811, première partie.

139. F. Arago, *ibid.*, p. 7-8.

polarisation de la lumière incidente. Adhérent convaincu au système laplacien, Arago n'imagine pas encore en 1811 qu'il apportera son aide à Fresnel lorsqu'il s'agira de valider la théorie des interférences, appliquée à la lumière polarisée. Une élégante solution sera apportée par Fresnel en 1821, soit dix ans après les observations d'Arago, à la difficile question des couleurs des lames minces. Le Normand exposera dans cette note¹⁴⁰ les conditions d'observation des interférences en lumière polarisée, marquant son opposition à la théorie de la *polarisation mobile* avancée par Biot pour justifier la polarisation des molécules de lumière dans le plan de section principale et dans le plan perpendiculaire.

Arago consacre la seconde partie de son mémoire aux phénomènes observés en remplaçant la feuille de mica par une lame épaisse de cristal de roche. Découpée perpendiculairement à l'axe optique, celle-ci n'est pas, à l'inverse de la lame de mica, biréfringente. Pour analyser la lumière transmise, il remplace le cristal de spath par une lunette prismatique de Rochon (Alexis-Marie Rochon, 1741-1817)¹⁴¹. Arago explique comment en dirigeant la lunette prismatique vers l'image réfléchie du Soleil, il peut observer les deux images de l'astre. L'interposition de la lame de quartz devant l'objectif provoque l'apparition des couleurs : *rouge très foncée* pour la première image tandis que l'autre se pare de la couleur complémentaire du rouge. Contrairement au phénomène observé avec la lame de mica, la rotation dans son plan de la lame de quartz n'apporte aucune modification. Mais en faisant tourner la totalité du dispositif, Arago observe que chaque image décrit les couleurs prismatiques. Il devine qu'à la traversée du cristal, la lumière a acquis des propriétés permanentes : la rotation des plans de polarisation des différentes molécules colorées. C'est la *polarisation rotatoire*.

Si les propriétés des rayons polarisés dépendent, comme le supposent les partisans du système de l'émission, des arrangements particuliers que prennent les molécules dont ils sont formés, il sera facile d'assigner la composition intime du rayon polarisé ordinaire et celle de ce même rayon à sa sortie de la lame de cristal de roche. Dans le premier rayon, en effet, les axes de toutes les molécules, quelles que soient leurs couleurs, seront parallèles ; dans

140. Augustin Fresnel, « Note sur la théorie des couleurs que la polarisation développe dans les lames minces cristallisées », *OC*, 1866, tome 1, N° XIX A, p. 523-532.

141. Sur la vie et l'œuvre de Rochon, en particulier sur l'invention du *micromètre prismatique*, lire Danielle Fauque, « Alexis-Marie Rochon, savant astronome et opticien (1741-1817) », *RHS*, 1985, tome 38, n°1, p. 3-36.

le second, les molécules de nuances différentes auront leurs pôles tournés vers diverses régions de l'espace.¹⁴²

Malus meurt le 24 février 1812, à seulement 36 ans. Il laisse une œuvre importante, récompensée par la médaille Rumford de la Royal Society. Arago va trouver dans cet héritage la part des éléments qui lui permettront de créer une instrumentation moderne. À la mort de Malus, grâce en particulier au travail d'Arago, le dépouillement expérimental des phénomènes nés de la polarisation de la lumière est déjà bien avancé. Pourtant Arago en restera aux observations de ses très nombreuses expériences et n'accomplira pas les travaux d'analyse qui eussent permis d'établir une théorie pour ses « brillantes trouvailles ». Comme le rappelle Theresa Levitt, les expériences d'Arago sur la lumière cherchent davantage à la précision des observations de l'astronome qu'à la structure intime de la lumière :

*Arago's primary relationship with light lay in trying to understand its optical path in order to ensure the accuracy of his instruments and the reliability of his observations.*¹⁴³

Les recherches ultérieures seront menées par Biot, le collègue et compagnon d'Arago dans l'aventure, commencée en 1806 de la mesure de l'arc de méridien entre Dunkerque et Barcelone¹⁴⁴. Le membre de la Société d'Arcueil, partisan d'une lumière constituée de corpuscules, soumis aux actions newtoniennes à leur traversée des milieux diaphanes, échafaude une théorie des polarisations chromatique et rotatoire¹⁴⁵ qui se verra contestée par la vision ondulatoire d'Augustin Fresnel, dans plusieurs notes publiées en 1821. Grâce aux travaux de Malus, Arago, Biot et Fresnel, ces années fastes voient la naissance de la *polarimétrie*, nouvelle science qui, comme le dit Jean Rosmorduc, à partir de la structure de la lumière cherche la structure de la matière¹⁴⁶. La renommée des travaux parisiens est telle qu'Arago sera sollicité par Young pour écrire l'article consacré au mot *polarisation* dans l'*Encyclopedia Britannica*.

142. F. Arago, *Œuvres*, tome 7, p. 345.

143. Theresa Levitt, « Editing out caloric : Fresnel, Arago and the meaning of light », *BJHS*, 2000, vol. 33, p. 49-65.

144. Cette initiative entraînera une brouille entre les deux savants.

145. Consulter à ce sujet Frédéric Leclercq, *Jean-Baptiste Biot (1774-1862) et la théorie corpusculaire de la lumière*, Thèse Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, 2008 et « Biot, la polarisation chromatique et la théorie des accès », 2008, *RHS*, n°1, tome 64, p. 121-156.

146. Jean Rosmorduc, *La polarisation rotatoire naturelle, de la structure de la lumière à celle des molécules*, Thèse Université de Bretagne occidentale, Brest, 1983, Librairie scientifique et technique A. Blanchard.

Mais Arago travaille déjà à développer une nouvelle instrumentation photométrique en lumière polarisée, qu'il mettra en œuvre pour ses observations astronomiques.

Dans son introduction à l'édition des œuvres de François Arago, Alexandre de Humboldt signale que son fidèle ami avait compris, à propos de la polarisation chromatique « la fécondité de ses applications dans la physique céleste et terrestre »¹⁴⁷. Cette clairvoyance s'exprime manifestement dans le mémoire de 1811 quant à la photométrie :

En profitant de la facilité qu'on a, avec la lunette prismatique, de faire plus ou moins empiéter les deux images du soleil, on peut comparer entre elles les intensités des différentes parties de son disque. En effet, s'il est évident, d'après ce que j'ai dit plus haut, qu'en plaçant le bord du soleil rouge sur le bord du soleil verdâtre, on doit obtenir un segment blanc, il n'est pas moins certain que cette neutralisation des couleurs n'aura lieu, quand on amènera le bord d'un des deux soleils sur le centre de l'autre, que dans le cas où ces deux portions du disque de cet astre seraient originairement de même intensité : il est facile de concevoir en effet que pour que deux faisceaux colorés puissent former du blanc par leur superposition, il ne suffit pas qu'ils soient complémentaires en couleur, il faut de plus qu'ils le soient en intensité.¹⁴⁸

Arago est convaincu que la prospérité de ses récentes découvertes est d'ores et déjà assurée par tout le profit que peuvent en tirer les observations astronomiques, que ce soient pour comparer la lumière du Soleil réfléchi par la Lune à celle émise par la Lune cendrée¹⁴⁹ ou régler la question des satellites galiléens de Jupiter. La méthode déployée par Arago dans ce but est longuement expliquée dans les trois premiers mémoires consacrés à la photométrie. Le Catalan a vite compris le pas important que la polarisation a fait franchir à la photométrie, en lui offrant une méthode de gradation de la lumière qui s'affranchit du réglage des distances : l'atténuation de la lumière d'une source peut se faire en la faisant se réfléchir sur un corps diaphane ou par la traversée d'un cristal biréfringent faisant office de polariseur puis en l'amenant à traverser un second cristal biréfringent faisant office d'analyseur. Si I est l'intensité lumineuse sur la face d'entrée de l'analyseur, selon la loi de Malus, l'intensité transmise par ce dernier est $I \cos^2(\alpha)$ en appelant α l'angle

147. F. Arago, *Œuvres*, tome 1, p. xxiv.

148. F. Arago, [Ara11], p. 118-119.

149. La partie de la Lune qui reçoit la lumière réfléchi par la Terre.

entre les plans de section principale des deux cristaux. Une simple rotation du cristal analyseur atténue la lumière incidente dans une proportion connue, fournie par la facile lecture de l'angle α . Or, cette loi n'a été établie que pour les valeurs les plus immédiates de $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ et 90° . Aux yeux d'Arago, c'est insuffisant pour prétendre à son utilisation à des mesures photométriques de précision. Il pose en préalable la validation de la « loi du cosinus carré » par une démonstration expérimentale, fournissant d'autres valeurs incontestables. À cette fin, il a conçu deux instruments : le *polariscope* et le *polarimètre* sur lesquels il fonde son instrumentation photométrique en lumière polarisée. Le premier utilise la propriété que possède le cristal de roche de fournir, après une double réfraction, des images colorées (cf. C.5). Une telle lame d'environ 12mm d'épaisseur, taillée perpendiculairement à l'axe optique d'une aiguille de quartz, sert d'objectif. À l'opposé, l'oculaire est un prisme biréfringent ou un cristal de spath, possédant une épaisseur d'environ 15mm . Ce cristal donne deux images qui se recouvrent en partie ou peuvent être séparées d'environ 1mm , en réglant la longueur de la lunette formée de deux tubes à coulisse. Arago explique :



fig. 2.6 – Lunette polariscope d'Arago

L'oculaire a est un cristal de spath ou un biprisme de Rochon ;

l'objectif b est une lame de quartz.

F. Arago, *Astronomie populaire*, tome 2, 2^e édition, 1865, p. 101.

Si la lumière qui pénètre dans l'instrument est neutre, les deux images sont incolores. Si la lumière est complètement polarisée, les deux images brillent des plus vives couleurs¹⁵⁰. Si enfin la lumière est partiellement polarisée, les deux images de l'ouverture sont colorées, mais d'autant moins vivement que la proportion de lumière polarisée contenue dans la faisceau éclairant est plus faible. Ces couleurs font découvrir les plus minimes proportions de lumière polarisée dans un faisceau mixte. C'est un procédé infallible et d'une sensibilité que rien n'égale.¹⁵¹

150. L'explication du phénomène est relativement simple dans le système des ondes, en les supposant transversales : lorsqu'un faisceau de lumière polarisée traverse la lame de quartz, celle-ci fait tourner d'un angle $\theta(\lambda)$ le plan de polarisation de chacune des composantes colorées de la lumière incidente. L'angle θ dépend de la longueur d'onde de la radiation.

151. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 177-178.

Le champ d'observation du polariscope montre (figure 2.7) deux croissants appelées « lunules ». Leur coloration permet de déceler les traces de polarisation dans la lumière observée.

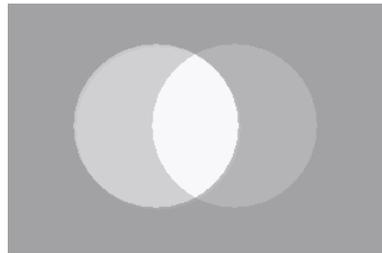


fig. 2.7 – Champ observé à travers la lunette polariscope d'Arago
En cas de polarisation, les deux *lunules* représentées en grisé affichent des couleurs complémentaires et la zone de recouvrement est blanche.

Arago date à 1815 ses premières expériences photométriques, réalisées avec un *appareil mobile*, tenu à la main, sans fournir plus de détails sur ces expériences. Il est possible qu'elles concernent, comme l'évoque James Lequeux¹⁵² la polarisation par réflexion vitreuse et qu'il ait utilisé une lunette polariscope. Mais le polariscope ne permet pas la mesure du taux de polarisation d'une lumière partiellement polarisée. La transformation de l'appareil en polarimètre demandera une longue maturation que l'astronome explique ainsi :

Au moment de livrer à l'appréciation du public le fruit de recherches poursuivies à bâtons rompus, pendant de longues années, mais avec des instruments perfectionnés, il m'a paru que mes communications ne devaient pas se borner à des faits isolés. Il était préférable de donner des résultats liés entre eux et constituant des chapitres définis et distincts de la science.¹⁵³

Un premier modèle de polarimètre réalisé par Soleil sera présenté devant l'Académie en juillet 1841. Arago nourrit des ambitions élevées pour son instrument : les ascensions aérostatiques doivent permettre de répondre aux questions d'optique atmosphérique. Un polarimètre embarqué fournira de précieuses indications sur « les lois de la distribution de la lumière dans l'atmosphère, soit à l'état neutre, soit à l'état de polarisation. »¹⁵⁴ Le principe de l'instrument consiste à rendre neutre la lumière observée en y introduisant

152. J. Lequeux, [Leq08], p. 206.

153. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 169.

154. *CRAS*, 1841, tome 13, p. 840-842.

la même quantité de lumière polarisée, mais à angle droit. Arago utilise à cette fin une *pile de glaces* qu'il monte à l'extrémité de son polariscope à lunules¹⁵⁵. On s'arrange pour que le plan de polarisation du faisceau incident coïncide avec le plan d'incidence. En faisant varier progressivement l'inclinaison de la pile, on peut neutraliser la lumière transmise. La neutralisation complète s'observe lorsque les lunules du polariscope sont dépourvues de couleurs. La sensibilité de l'instrument sera déterminée précisément par Arago en utilisant la propriété suivante qui est un corollaire de la loi de Malus : si la lame cristalline est traversée par un faisceau de lumière polarisée dans l'azimut i par rapport à la section principale, le faisceau émergent contient une fraction de lumière polarisée dans le plan de section principale égale à $\cos 2i$. Pour $i = 45^\circ$, le faisceau se retrouve totalement dépolarisé. Une rotation de la lame de $48'$ rend de nouveau les couleurs appréciables, ce qui correspond à un azimut de $45^\circ \pm 24'$ et à une différence d'intensité de $2 \times \cos(2 \cdot 44^\circ 36')$, soit $1/72$ ¹⁵⁶.

Un étalonnage préalable est nécessaire afin de faire correspondre à chaque inclinaison de la pile une quantité de lumière polarisée connue. Pour cela, Arago utilise une lumière totalement polarisée d'intensité F et lui fait traverser une lame de quartz qu'il fait tailler parallèlement, cette fois, à l'axe optique pour obtenir un cristal biréfringent. La lame laisse ainsi émerger deux rayons polarisés à angle droit : si la loi du « cosinus carré » est vraie, leurs intensités respectives dans un azimut i (l'angle entre le plan de polarisation du faisceau incident et l'axe optique de la lame) sont $F \cdot \cos^2(i)$ pour le faisceau ordinaire et $F \cdot \sin^2(i)$ pour le faisceau extraordinaire. Si i est inférieur à 45° , le faisceau extraordinaire est en mesure de *neutraliser* une quantité $F \cdot \sin^2(i)$ du faisceau ordinaire, ce qui conduit à une quantité $2F \cdot \sin^2(i)$ de lumière neutre. La quantité restante de lumière polarisée se réduit donc à $F \cdot \cos^2(i) - F \cdot \sin^2(i) = F \cdot \cos(2i)$. Le rapport de la lumière polarisée à la lumière totale est donc $\cos(2i)$. Ce faisceau dont le taux de polarisation est maintenant connu est reçu sur la pile de glaces que l'on incline jusqu'à ce que la coloration donnée par la lunette polariscope disparaisse. On peut ainsi construire la table des lumières polarisées correspondant aux différentes incidences sur la lame. Ces données seront présentées à l'Académie lors de la

155. Une pile de glaces (voir C4 p. 379) est un empilement de lames de verre à faces parallèles, maintenues sur un cadre rigide. On empêche le contact entre les lames à l'aide de minces bandes de papier collées sur les bords. Une théorie complète des piles de glaces est fournie par Paul Desains (1817-1885) dans ses *Leçons de physique*, Paris, Dezobry et Magdeleine, 1860, tome 2, p. 516-521.

156. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 229-230 et E. Mascart, *Traité d'optique*, Tome 3, p. 182.

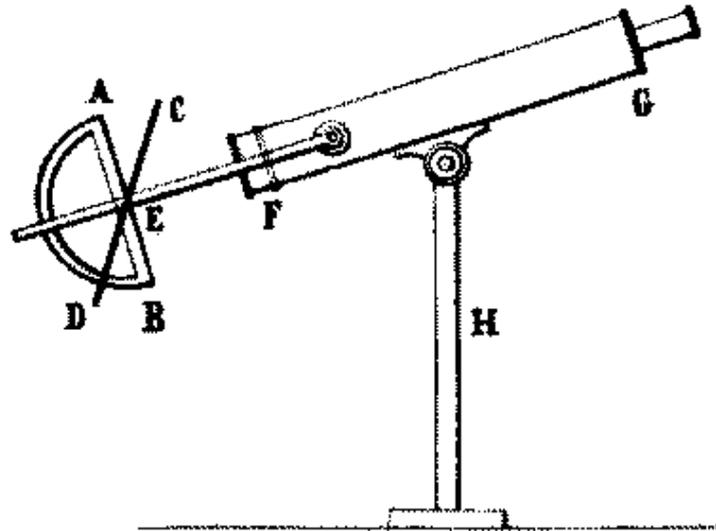


fig. 2.8 – Le polarimètre d’Arago

La pile de glace CD pivote devant le demi cercle gradué AB. L’inclinaison de la pile est donnée par l’angle DEB. Le polariscope est représenté par le tube FG. On observe la coloration des lunules à travers l’oculaire en G. Tiré des *Leçons de physique* de P. Desains, tome 2, p. 515.

séance du 11 novembre 1850¹⁵⁷. C’est Ernest Laugier (1812-1872), astronome de l’Observatoire qui va établir cette table en lieu et place d’Arago sans doute déjà atteint en 1850 d’une rétinopathie d’origine diabétique, responsable de « l’altération profonde » de sa vue.

Le 18 mars 1850, Arago présente à l’Académie son *Premier mémoire sur la photométrie* dont l’objet principal est la *Démonstration expérimentale de la loi du carré du cosinus*. Il prend soin de préciser en préambule que la méthode employée ne saurait utiliser les graduations de son polarimètre établies en utilisant la loi qu’il veut justement démontrer. Cela posé, Arago expose sa méthode qui repose sur les points suivants :

- première mesure : Arago fait se réfléchir un faisceau de lumière sur une lame de verre (crown glass) sous une incidence de $17^{\circ}17'$ mesurée par rapport à la surface (soit environ 73° par rapport à la normale). Des mesures préalables lui ont montré que, sous cette incidence, l’intensité réfléchie est $I/2$, la moitié de l’intensité I transmise. Or Arago a démontré que l’intensité de lumière polarisée dans le faisceau transmis par une lame de verre est égale à celle présente dans le faisceau réfléchi. D’où comme conséquence immédiate

157. *CRAS*, 1850, tome 31, n° 20, p. 665 et Arago, *Œuvres*, tome 10, p.274-275.

que si p est le taux de polarisation du faisceau réfléchi, ce taux pour le faisceau transmis est $p/2$.

- deuxième mesure : en inclinant la pile de glace d'un angle α , Arago obtient la neutralisation de la lumière réfléchie, qu'il contrôle visuellement avec le polariscope. De même, une inclinaison de la pile de glace d'un angle α' permet la neutralisation de la lumière transmise.
- troisième mesure : un nouveau faisceau polarisé par réflexion est dirigé vers une lame de quartz rendue biréfringente par une taille parallèle à l'axe de l'aiguille. Pour l'inclinaison α de la pile du polarimètre, mesurée au point 2, on fait tourner la lame autour du faisceau et on cherche quel est l'azimut i par rapport au plan de réflexion du faisceau incident qui neutralise la polarisation. On recommence l'opération pour l'inclinaison α' , ce qui conduit à une seconde valeur de l'azimut, i' .
- conclusion : si la loi du cosinus carré est exacte, les proportions de lumière polarisée dans les faisceaux réfléchi et transmis sont dans le rapport $\cos(2i)/\cos(2i') = 2$. Arago mesure les angles suivants : $i = 27^\circ 58'$ et $i' = 36^\circ 42'$, ce qui donne un rapport de 1,96 au lieu de 2.

Arago renouvelle les expériences dans d'autres conditions : les mesures sur les faisceaux réfléchi et transmis dont le rapport des intensités est $1/3$ fournissent les azimuts suivants : $i' = 23^\circ 19'$ et $i = 38^\circ 19'$, ce qui conduit au rapport $\cos(2i')/\cos(2i) = 2,97$, au lieu de 3.

On peut s'étonner d'une publication si tardive de ces résultats — le premier mémoire sur la photométrie est présenté devant l'Académie le 18 mars 1850 ; le second mémoire, lors de la séance du 15 avril suivant —, circonstances qui semblent indiquer de la part d'Arago un faible intérêt pour cette partie de l'optique reléguée à la toute fin de ses œuvres et un manque de constance chez un savant souvent qualifié de « touche-à-tout ». Un examen des œuvres de l'académicien montrent au contraire son implication presque permanente dans la photométrie expérimentale et instrumentale. Le Directeur des observations de l'Observatoire de Paris ne peut se passer des progrès de la photométrie, auxquels il participe en développant des méthodes inédites. Les campagnes de mesure aussi nombreuses que délicates et fastidieuses, menées par lui-même et ses propres collaborateurs qui sont Ernest Laugier et Frédéric Petit (1810-1865), vont se suivre tout au long de sa carrière. L'une de ces campagnes concerne notamment la *construction de la table des quantités de lumière réfléchie et de lumière transmise par une lame de verre à faces parallèles*. L'obtention de ces données, utilisées d'ailleurs par Arago dans sa démonstration de la loi du carré du cosinus, forme l'objet du *deuxième mémoire*

sur la photométrie¹⁵⁸. Dans ce but, Arago a conçu un nouvel instrument, qu'il appelle lui-même « photomètre » et qu'il fera construire par Gambey, puis dans les ateliers de Jules Duboscq (1817-1886), le gendre de Jean-Baptiste Soleil¹⁵⁹. L'appareil (figure 2.9) est construit selon les mêmes principes que

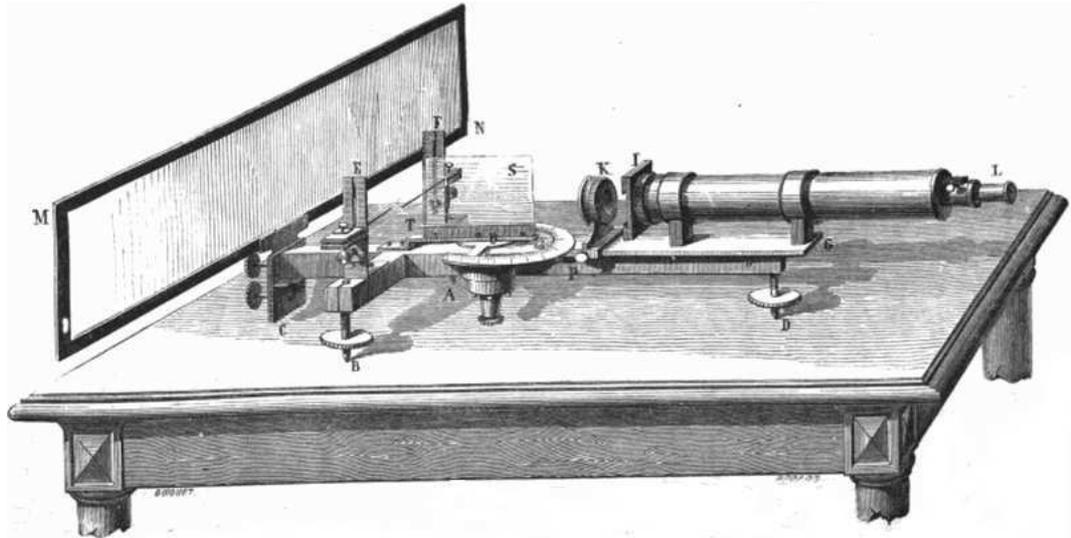


fig. 2.9 – Le photomètre d'Arago

Tiré de F. Arago *Œuvre*, Paris, Gide, 1858, tome 10, p. 196.

ceux utilisés par Arago dans ses expériences antérieures : emprunter la lumière à une source étendue et constante, en l'occurrence un large écran de papier blanc, tendu sur le cadre *MN*, de dimension $1m \times 0,3m$, éclairé par une large portion d'un ciel couvert ; utiliser un prisme biréfringent pour diviser très exactement la lumière par deux, ou par quatre... Le petit tube *K* sert de monture à ce prisme. La lame de verre *S* à faces parallèles est disposée verticalement et perpendiculairement à l'écran *MN*. Sur le chemin de la lumière diffusée par l'écran, sont placées deux broches noircies, implantées presque à la même hauteur dans les deux glissières *E* et *F*. L'observation se fait à l'œil nu, à travers un tube noirci *IL* fixé sur une règle horizontale, mobile autour de l'axe *O*. Un cercle gradué muni d'un vernier permet de mesurer très précisément l'angle entre la plaque de verre et le rayon visuel dirigé dans le tube *IL*. Le tube est terminé du côté de l'oculaire par une fente très fine verticale. Le champ de vision se ramène à un rectangle vertical lumineux sur lequel se dessinent les ombres des broches. Supposons le tube d'observation

158. Un résumé, censé avoir été publié dans les comptes rendus de l'Académie (numéro du 1er avril 1839), ne le sera que dans le numéro 13, du tome 30 de l'année 1850.

159. Une présentation de l'instrument sera faite devant l'Académie dans sa séance du 11 août 1845 (*CRAS*, 1845, tome 21, p. 346-347.)

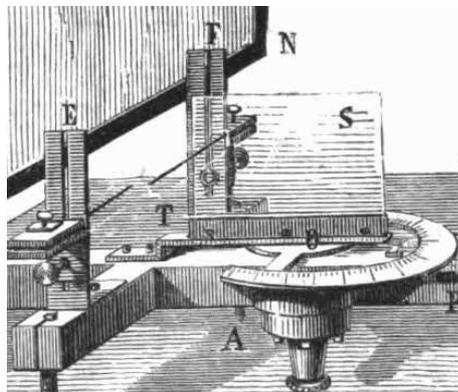


fig. 2.10 – Photomètre d'Arago : détail .
Arago *OC*, tome X, Paris, Gide, 1858, 196.

placé du côté droit de la plaque de verre. La lumière de l'écran arrive sur la plaque, sauf celle qui est interceptée par la broche, tandis que la lumière transmise peut arriver librement à l'œil de l'observateur qui voit l'ombre de la broche de droite éclairée par la lumière transmise. Mêmement, la broche située du côté opposée occulte une partie de la lumière de l'écran qui devrait être transmise, ce qui forme une ombre dans le champ d'observation éclairée cette fois par la seule lumière que réfléchit la plaque. L'observateur manœuvre la règle jusqu'à obtenir l'égalité d'apparence des deux ombres, ce qui signifie l'égalité des intensités transmises et réfléchies pour l'incidence déterminée à partir de l'angle lu sur le cercle. Le savoir-faire de la maison Gambey permet d'atteindre une résolution de la minute d'arc. Pour résoudre l'erreur commise par une différence éventuelle de luminance entre les points de l'écran dont sont issus les rayons réfléchis (partie gauche) et ceux correspondants aux rayons transmis (partie droite), on procède à une seconde mesure en plaçant le tube d'observation de l'autre côté de la plaque de verre. Le résultat retenu est la moyenne arithmétique des deux mesures. Arago trouve ainsi que l'inclinaison pour laquelle l'intensité transmise est égale à l'intensité réfléchie est exactement $11^{\circ}8'$.

Mais pour établir la table des intensités transmises et réfléchies, il faut recueillir des valeurs supplémentaires, par exemple les inclinaisons pour lesquelles l'intensité réfléchie est la moitié de l'intensité transmise, le quart, le huitième, etc. En visant les rayons transmis à travers une lame de cristal de roche, convenablement taillée et placée à l'entrée du tube d'observation, on sépare en deux parties le faisceau transmis et on obtient deux images d'égale intensité pour la broche sous la lumière transmise. Il reste à chercher l'incidence pour laquelle l'image réfléchie d'intensité R est égale à l'une des deux

images transmises d'intensité $T/2$. Arago trouve par ce procédé $17^{\circ}17'$. L'addition dans le dispositif d'un deuxième prisme biréfringent doit permettre la mesure de l'incidence pour la proportion du quart, etc. Arago obtient ainsi les proportions pour une série de six incidences : $4^{\circ}32'$, $7^{\circ}1'$, $11^{\circ}8'$, $17^{\circ}17'$, $21^{\circ}39'$, $26^{\circ}38'$. Tel qu'il est conçu, l'instrument ne permet les mesures que pour les faibles incidences. Mais en tirant profit de la transmission de la lumière de l'écran à travers une seconde plaque de verre, il est possible d'achever la table pour les incidences élevées, de $36^{\circ}36'$ jusqu'à $89^{\circ}26'$. Les calculs d'interpolation effectués par Laugier et Petit fournissent une table complète des proportions des lumières transmise et réfléchi par rapport à la lumière incidente, pour les incidences comprises entre 4° et 90° ¹⁶⁰.

Arago peut maintenant utiliser son instrument pour répondre à plusieurs questions de photométrie qui n'ont reçu jusqu'alors que des réponses imparfaites ou contradictoires. Il s'agit en particulier de la perte de lumière occasionnée par sa réflexion à la surface des métaux. Sur cette question, Arago ne dispose guère que des données de Bouguer publiées en 1760 par Nicolas-Louis de Lacaille (1713-1762) dans le livre II du *Traité d'optique sur la gradation de la lumière*. À la suite de ses expériences menées sur la surface du vif-argent (le mercure) et sur des miroirs de métal, le savant breton affirmait « qu'il se perd au moins un quart de la lumière par la réflexion, & apparemment qu'il n'y a pas de corps qui éteigne ou amortisse moins la lumière. »¹⁶¹. Il ajoutait que « la réflexion n'est pas également vive sous tous les angles d'incidence. En général, elle est plus forte sous les petits angles, & plus faible sous les grands. »¹⁶². Bouguer compléta ses observations par la construction des tables marquant les quantités de lumière réfléchi pour les différentes inclinaisons de la lumière incidente. La première table représente l'intensité réfléchi par la surface de l'eau (*l'eau d'Arcueil* précise Bouguer), elle est construite à partir de quelques valeurs expérimentales singulières et d'un modèle mathématique présumé par Bouguer : pour une intensité incidente prise égale à l'unité, il propose une intensité réfléchi conforme à $A + Bz^3 + Cz^6$ où z est le *cosinus verse* de l'angle d'incidence. Trois observations effectuées respectivement aux incidences de 90° , de 25° et sous l'incidence rasante déterminent les coefficients A , B et C et conduisent à $\frac{1}{55} + \frac{1}{3}z^3 + \frac{2}{5}z^6$, formule exprimant la *force* de la réflexion sous toutes les incidences¹⁶³. De la même façon, Bou-

160. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 208-209.

161. P. Bouguer, *Traité*, p. 124-125.

162. Les angles sont comptés par rapport à la surface, précise Bouguer et selon une habitude de son temps

163. La table fournit ainsi pour l'incidence rasante ($0, 5^{\circ}$) : 721 rayons réfléchis pour 1000 incidents, pour 25° : 97 rayons réfléchis pour 1000 et pour l'incidence normale (90°) : 18 rayons réfléchis pour 1000.

guer établit une table des *réflexions produites par les Glaces* dont on fait les miroirs, pour constater que celles-ci diminuent de l'incidence rasante (584 rayons réfléchis pour 1000, à l'incidence de $2\frac{1}{2}^\circ$ pour atteindre la 40^e partie de la lumière directe pour l'incidence normale)¹⁶⁴.

L'augmentation de l'intensité réfléchi par la diminution de l'inclinaison (par rapport à la surface réfléchissante), fait bien établi par Bouguer semble contredite par les estimations plus tardives publiées par Richard Potter (1799-1868)¹⁶⁵. Le photomètre utilisé par Potter est identique dans son principe à celui de Bouguer auquel il a ajouté les modifications nécessaires à l'observation de la lumière réfléchi. L'observateur compare les éclaircissements de deux surfaces contiguës, par transparence sur un écran de papier fin. L'une des plages est éclairée par la flamme d'une source de référence. L'autre plage est éclairée successivement par la lumière directe d'une seconde source, puis par la lumière de cette même source, réfléchi par un miroir de petite dimension. L'observateur réalise dans les deux cas l'égalisation visuelle avec la source de référence. Une pièce de bois mobile permet d'occulter successivement la lumière réfléchi et la lumière directe. La surface réfléchissante est réalisée dans un alliage composé d'environ $\frac{1}{3}$ d'étain et $\frac{2}{3}$ de cuivre.¹⁶⁶ À l'opposé des résultats de Bouguer, ceux de Potter montrent une décroissance du taux de lumière réfléchi lorsque l'obliquité augmente de l'incidence perpendiculaire jusqu'à l'incidence rasante. Potter modélise cette décroissance par un modèle mathématique affine : $y = a \cdot x + b$ avec les estimations suivantes : $a = \tan(355^\circ 12')$ et $b \cong 72,3$. Le protocole utilisé par Potter ne peut pas conduire à une précision remarquable. Comme le soulignera bien plus tard John Conroy (1845-1900)¹⁶⁷, l'ombre noire portée sur l'écran, qui sépare les deux plages d'observation, limite la sensibilité de l'égalisation visuelle. De plus, souligne-t-il, la mesure de l'angle d'incidence ne peut se faire avec toute la précision exigée, à cause de la proximité de la source et du miroir¹⁶⁸.

Les doutes soulevés par les résultats de Potter, demandent aux yeux

164. P. Bouguer, *Traité*, p. 137.

165. R. Potter, « An Account of Experiments to determine the quantity of Light reflected by Plane Metallic Specula under different Angles of Incidence. With a Description of the Photometer made use of. », *Edinburgh journal of science*, vol. 3, 1830, p. 278-288.

166. Appelé *speculum metal*, cet alliage (bronze) possède un important pouvoir de réflexion, ce qui explique son utilisation par Newton et par Herschel pour la construction de leurs télescopes, en remplacement des miroirs en bronze traditionnel dont la teneur en étain est plus faible.

167. J. Conroy, « Some Experiments on Metallic Reflexion. N°III. On the Amount of Light Reflected by Metallic Surfaces. », *Phil. Trans.*, 1883, p. 26-41.

168. Une analyse complète de la méthode de Potter est fourni par Xiang Chen, « Measuring Reflective Power with the Eye », *Physics in Perspective*, Basel, Birkhäuser Verlag, 2001, p. 439-461.

d'Arago une expertise qu'il réalise avec son photomètre. La lumière de l'écran, réfléchi par le miroir en épreuve et transmise par la lame de verre du photomètre est comparée à la lumière directe émise par l'écran et réfléchi sur la lame de verre. La valeur de l'angle d'observation, pour lequel l'égalisation visuelle est réalisée, permet à l'aide de la table établie par Petit et Laugier d'obtenir la proportion de lumière réfléchi par le miroir par rapport à la lumière directe. Armé de son instrument dont le constructeur Gambey est garant de la précision, Arago se contente de vérifier la décroissance de l'intensité réfléchi à partir des résultats fournis aux incidences de 16° et de 36° pour le platine, l'acier et le miroir de télescope. Ces mesures sont malheureusement insuffisantes pour valider les théories de la réflexion de la lumière par les surfaces métalliques. Si les travaux d'Arago sont un modèle de rigueur et de minutie, il est surprenant qu'ils n'aient pas été comparés aux résultats que la théorie, grâce en particulier aux travaux de Fresnel, était déjà en mesure de fournir¹⁶⁹. Jamin effectuera un travail expérimental beaucoup plus abouti sur la réflexion métallique en lumière polarisée. Les résultats de ce dernier pour l'acier poli et le métal des miroirs seront publiés en 1847. Ils montrent que l'intensité de la lumière réfléchi, polarisée dans le plan d'incidence augmente progressivement depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante. Si inversement la lumière est polarisée dans l'azimut de 90° , l'intensité diminue depuis l'incidence rasante jusqu'à un angle appelé « angle de polarisation maximum », et elle augmente ensuite jusqu'à l'incidence normale¹⁷⁰.

2.7 Photométrie astronomique

Le nom d'Arago est souvent associé aux progrès de la photométrie astronomique, dans la première moitié de son siècle. Lors de la séance du 9 avril 1834, le Bureau des longitudes désigne Arago Directeur des observations de l'Observatoire de Paris. L'assemblée en profite pour nommer élèves observateurs Eugène Bouvard, le propre neveu du Directeur de l'Observatoire et Ernest Laugier¹⁷¹. Dans l'entourage d'Arago, à l'Observatoire, va ainsi se former une nouvelle génération d'élèves astronomes, dont certains âgés d'à peine vingt ans : Ernest Laugier (1812-1872), Victor Mauvais (1809-1854), Hervé Faye (1814-1902), Eugène Bouvard (1812-1879), Émile Goujon (1823-1856), Émile Plantamour (1815-1882), Ernest Liouville (1812-1880), Antoine

169. Pour une discussion sur les résultats d'Arago, lire J. Lequeux, [Leq08], p. 465-468.

170. J. Jamin, « Sur la réflexion métallique », *ACP*, 1847, sér. 3, tome 19, p. 296-341. et *Cours de physique de l'École polytechnique*, 4^e édition, 1887, tome 3, fasc. 3, p. 602-604.

171. Laugier qui est encore élève de l'École polytechnique devra, comme Arago, choisir entre une carrière d'officier et une carrière scientifique. Le jeune Laugier, qui épousera la nièce d'Arago, fera comme avait fait ce dernier et choisira l'astronomie.

Yvon Villarceau (1813-1883) et Pierre Butillon (1817- ?), pour citer ceux de la liste fournie par Pascal Descamps¹⁷². Arago est à l'origine d'avancées majeures que le savant va largement utiliser : d'abord, sa démonstration de la loi du « cosinus carré », ensuite les instruments qu'il a inventés : micromètre, polarimètre et photomètre. Au poste stratégique de directeur des observations, Arago a maintenant les coudées franches pour développer, à côté de l'astronomie d'observation et de ses fastidieuses routines, une étude physique du ciel et des objets célestes, programme qui fait de l'astronome le précurseur d'une discipline qui connaîtra d'immenses développements : l'astrophysique. Mais pour Arago, le défrichage de ce vaste terrain de recherches a débuté bien avant cette prise de fonction, quand équipé de sa lunette polariscope, il mène une exploration systématique de la polarisation de notre atmosphère : le registre de ses observations commence à la date du 22 novembre 1812 et se poursuit jusqu'au 20 septembre 1815¹⁷³. Le balayage du méridien solaire avec son polariscope lui permet de mettre en évidence un *point neutre*, c'est à dire un azimut pour lequel la lumière de l'atmosphère n'est pas polarisée. La technique de recherche des points neutres, inventée par Arago constitue le départ de la polarimétrie atmosphérique. Quelques années plus tard, en 1840, un second point neutre de l'atmosphère terrestre sera mis en évidence par Jacques Babinet, au-dessus du Soleil couchant, à une hauteur semblable à celle du point neutre d'Arago, dans la partie opposée du ciel¹⁷⁴. Enfin, David Brewster décèlera un troisième point neutre, peu de temps après, dans une zone difficile aux observations¹⁷⁵.

Les recherches d'Arago sur la « Constitution physique du Soleil et des étoiles » se sont certainement déroulées sur un temps long. L'étude sera publiée très tardivement, sous ce nom, dans une notice qui sera présentée à l'Institut par Laugier, lors de la séance du 25 octobre 1851¹⁷⁶. Mais il faut supposer que les observations d'Arago appartiennent à une longue période, initiée à une date bien antérieure. La physique du Soleil est prétexte à plusieurs hypothèses : certaines évoquent un astre obscur, entouré d'une dense

172. P. Descamps, « La découverte de Neptune : entre triomphe et camoufflet », *RHS*, 2015, tome 68, n°1, p. 47-79.

173. Une évaluation de la polarisation de l'atmosphère éclairée par la lumière de la Lune sera aussi faite en octobre 1842. Voir F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 548-560 et la *notice sur la polarisation*, tome 7, p. 394.

174. J. Babinet, « Sur un nouveau point neutre, dans l'atmosphère », *CRAS*, 1840, tome 11, p. 618-620.

175. D. Brewster, « Observations of the Polarisation of the Atmosphere, made at St Andrews in 1841, 1842, 1843, 1844 and 1845. », *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1864, vol. 23, p. 211-241 et *Physical Review*, 1866, vol. 1, p. 81-82.

176. F. Arago, « Constitution physique du Soleil et des étoiles », *Œuvres*, tome 7, p. 112-135.

couche nuageuse, elle-même entourée d'une couche lumineuse, appelée « photosphère ». Des *éclaircies* dans la couche nuageuse laisseraient apparaître le corps obscur central, ce qui expliquerait la présence des fameuses taches solaires. D'autres auteurs les expliquent comme les scories sorties de volcans et flottant à la surface d'un astre liquide. Pour Arago, la nature de la matière incandescente du Soleil, solide, liquide ou gazeuse, peut être connue par l'utilisation de la lunette polariscope. Il a en effet observé que la lumière émise sous un angle suffisamment petit, par un corps incandescent, solide (fer forgé) ou liquide (fonte de fer ou platine en fusion) présente des marques évidentes de polarisation, comme le laisse voir les colorations des lunules formées dans le champ de la lunette. En revanche, l'observation de la lumière d'un gaz enflammé, comme celui sortant d'un bec d'éclairage, fournit une image parfaitement blanche, signe de l'absence de polarisation. C'est cette même absence de couleurs qui a été constatée lors de l'observation du disque solaire avec de grandes lunettes polariscopes, démontrant par là la nature gazeuse de la photosphère solaire¹⁷⁷.

Le sixième mémoire sur la photométrie commence naturellement par un exposé sur la nature physique des autres étoiles qui, parce que trop lointaines, ne se présentent pas, comme le Soleil, sous la forme d'un disque de diamètre apparent appréciable. Arago souligne alors une difficulté :

Réunissons (...) dans un faisceau unique les rayons partant de tout le contour de l'astre, et ces rayons, quoiqu'ils puissent être polarisés, comme émanant d'un corps solide ou liquide, formeront par compensation un faisceau neutre.¹⁷⁸

En effet, les rayons issus de points placés sur le contour de l'astre, dans des positions rectangulaires auront des états de polarisation opposés. L'absence de polarisation ne signifie donc pas pour autant que la photosphère est gazeuse. Cette difficulté disparaît dans l'examen des étoiles dites « changeantes » pour lesquelles cette compensation ne peut pas être complète. Arago affirme ainsi que « l'observation attentive de plusieurs étoiles changeantes, faite avec la lunette polariscopique dans toutes les parties de leurs phases, a démontré que leur lumière reste constamment d'une blancheur parfaite. » Il conclut donc à la nature gazeuse de la photosphère de ces étoiles et à « la confirmation complète de l'identité de notre Soleil avec les innombrables étoiles qui peuplent le firmament. »¹⁷⁹

177. Voir F. Arago, *Astronomie populaire*, tome 2, Barral, 1865, p. 102-104. et *Œuvres*, tome 7, 1858, p. 118-120.

178. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 262.

179. F. Arago, *ibid.*, p. 264.

L'utilisation de la lunette polariscope est donc la méthode phare sur laquelle l'astronome fonde l'observation des corps célestes et l'astrophysique. Tant qu'il sera en position de le faire, Arago apportera à son instrument les améliorations essentielles pour l'adapter en particulier à la photométrie stellaire, en vue de comparer les étoiles par leur intensité lumineuse. L'un de ces amendements est procuré par une invention, en 1828, du physicien et géologue écossais William Nicol (1766-1851). Taillé dans un cristal biréfringent de spath d'Islande, le prisme de Nicol permet d'obtenir, à partir d'un faisceau de lumière neutre, un faisceau totalement polarisé perpendiculairement au plan de section principale. Ce faisceau (il s'agit du faisceau extraordinaire) est transmis quasiment dans la même direction que le faisceau incident, ce qui simplifie la conception des instruments. Le faisceau ordinaire est quant à lui absorbé par l'une des faces noircies du prisme (annexe C.6). Le photomètre imaginé par Arago est une lunette prismatique de Rochon devant laquelle est placé un polariseur : soit un prisme de spath d'Islande soit un prisme de Nicol qui élimine donc le faisceau ordinaire, facilitant ainsi les observations.

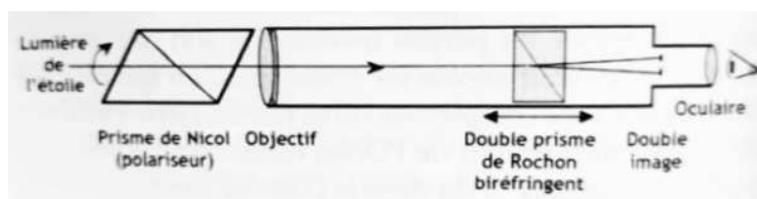


fig. 2.11 – L'appareil photométrique d'Arago

Tiré de J. Lequeux, [Leq08], p. 296.

Document produit avec l'aimable autorisation de monsieur James Lequeux, Observatoire de Paris-Meudon, université PSL.

Soit I_o l'intensité de la lumière d'une étoile qui pénètre dans l'instrument d'Arago par la gauche, sur le schéma de la figure 2.11. Il a été montré que cette lumière n'est pas polarisée. Elle traverse le prisme de Nicol et, à sa sortie, se trouve entièrement polarisée ; son intensité est $I_o/2$ puisque le faisceau ordinaire est éliminé. Cette lumière émergeant du prisme de Nicol pénètre dans la lunette de Rochon. En traversant le double prisme de Rochon, elle donne dans l'oculaire deux images de l'étoile. Il est possible de régler l'écartement de ces deux images par le déplacement longitudinal du double prisme. Il est aussi possible de faire tourner le prisme de Nicol autour de son axe et devant un cercle gradué pour modifier l'intensité relative des deux images.

Imaginons un premier pointé sur une source de référence, par exemple une étoile de magnitude connue : Arago règle l'angle du prisme de Nicol dans une position telle que l'image la plus faible de l'étoile disparaisse dans le fond du ciel. Un second pointé est réalisé vers la source étudiée, une étoile de

magnitude inconnue : la disparition dans le fond du ciel est obtenue en faisant tourner le Nicol d'un angle i par rapport à la position du premier pointé. À partir de ces deux relevés, la loi du « cosinus carré » donne le rapport de l'intensité inconnue à celle de l'étoile de référence.

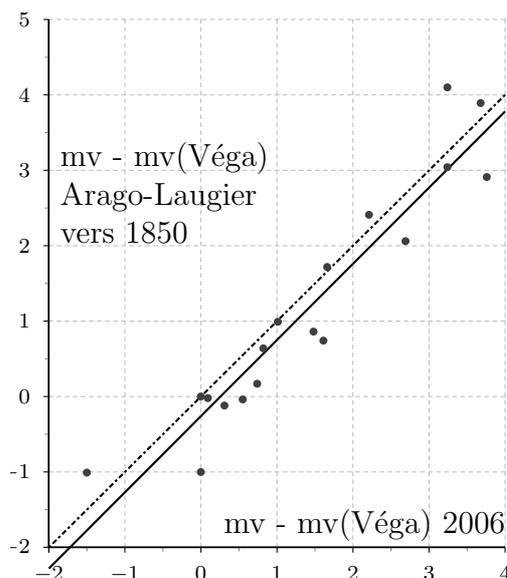


fig. 2.12 – Comparaison des photométries stellaires obtenues par Arago et Laugier, vers 1850, avec les mesures modernes (2006). Les mesures se rapportent à Véga.

Le cas idéal correspondrait à des points alignés sur la première bissectrice (représentée en pointillés). La dispersion statistique des points se fait autour d'une droite dont la pente est voisine de l'unité. Graphique établi d'après les données aimablement fournies par monsieur James Lequeux, Observatoire de Paris-Meudon.

Les résultats obtenus par Laugier, consignés dans le tome 10 des œuvres complètes, p. 266-270, donnent les intensités d'étoiles de différentes grandeurs, rapportées à Sirius ou « α du Grand chien », l'étoile la plus brillante du ciel. Le graphique ci-dessus permet une comparaison des résultats photométriques, obtenus en 1850 par Arago et Laugier avec ceux de la photométrie stellaire moderne¹⁸⁰. Les coordonnées expriment les magnitudes des étoiles par la formule de Pogson (Robert Pogson, 1829-1891) : $m = -2.5 \times \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right)$ où I est l'éclat de l'étoile et I_{ref} celui d'une étoile de référence. Cette fois, l'étoile de référence est Véga ou « α de la Lyre ». Le rassemblement des

¹⁸⁰. Il s'agit ici des valeurs de la base de données *SIMBAD*, « la base de données de référence pour la nomenclature et la bibliographie des objets astronomiques (en dehors du système solaire) » développée par le Centre de Données de l'Observatoire Astronomique de Strasbourg.

points autour de la première bissectrice montre que les évaluations de Laugier sont correctes. La dispersion peut s'expliquer par les fluctuations du fond du ciel ainsi que par « la turbulence atmosphérique qui étale plus ou moins les images »¹⁸¹, facteurs qui, avec la faillibilité de l'observateur, déterminent les limites de la méthode. La mort d'Arago en 1853 et la reprise en main de l'Observatoire par le nouveau directeur, Urbain le Verrier (1811-1877), vont mettre fin à ce programme de mesures et ne permettront pas la construction d'un catalogue stellaire conséquent. La validité de ce procédé innovant n'est pourtant pas en cause : Edward Charles Pickering (1846-1919) directeur de l'observatoire astronomique d'Harvard utilisera un photomètre stellaire, exactement identique dans son principe et ses composants à celui utilisé par Arago et Laugier : un prisme polariseur de Nicol, cette fois placé près de l'oculaire, suivi d'un double prisme de Rochon permettant l'obtention des deux images¹⁸². Il établira ainsi, mais plus de trente ans après les premières mesures d'Arago, les magnitudes du grand catalogue d'Harvard¹⁸³.

L'autre question de physique solaire qui taraude Arago en tant qu'astrophysicien est l'assombrissement du bord du Soleil. Cette diminution apparente de l'intensité lumineuse du Soleil sur ses bords par rapport au centre a été constatée et évaluée par Bouguer, observation contredite par Lambert quelques années plus tard¹⁸⁴. Selon l'estimation de Bouguer, rapportée par Arago, « l'intensité de la portion centrale du Soleil est à l'intensité d'une portion située aux trois quarts du rayon, à partir du centre, comme 48 à 35. »¹⁸⁵ ce qui correspondrait à une différence entre le centre et le bord comme entre les nombres 48 et 30. La méthode mise en œuvre par Arago pour vérifier cette estimation utilise le même fond instrumental : la lumière provenant de l'astre est avant tout polarisée à l'aide d'un prisme de spath d'Islande. Une lunette de Rochon lui fournit deux images du disque solaire dont il peut régler à volonté la distance de séparation. En faisant tourner le prisme de spath autour de son axe, il est possible de modifier l'intensité comparative des deux images qui peut se déduire de la mesure de l'angle entre les plans de section principale du prisme de spath et du prisme de Rochon. Les mesures sont dé-

181. J. Lequeux, [Leq08], p. 302.

182. « Photometric observations by Edward C. Pickering, Director », *Annals of the Astronomical Observatory of the Harvard College*, Cambridge, University Press, John Wilson and son, 1879, vol. 11, part. 1, p. 1-8.

183. Ni dans sa préface, ni dans le chapitre 1 consacré à la description du photomètre utilisé, Pickering ne citera le nom d'Arago, qui peut être pourtant considéré comme le père de la méthode d'examen des magnitudes en lumière polarisée.

184. L'assombrissement « centre-bord » ou assombrissement du limbe (en anglais *limb-darkening*) d'une étoile est un phénomène aujourd'hui expliqué, en astrophysique, par la décroissance de la densité et de la température avec la distance au centre de l'étoile.

185. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 233.

licates et Arago vérifie en premier la sensibilité de l'œil aux intensités mises en jeu. Avec la vis micrométrique de sa lunette, Arago superpose d'abord les deux images et, partant d'une position angulaire du spath où l'on ne voit qu'une image, fait tourner le cristal jusqu'à rendre visible le bord de l'image faible sur le bord de la première image. L'angle mesuré sur le cercle gradué de l'instrument indique alors 9° , ce qui correspond, en utilisant la loi du cosinus carré, à une différence d'intensité de $1/40$ entre l'image forte et l'image faible. Arago superpose ensuite le bord de l'image faible avec le centre de l'autre et il constate l'apparition bord sur centre pour une rotation du spath toujours égale à 9° . Or l'estimation de Bouguer devrait se manifester par une différence angulaire de $1^\circ 29'$ entre l'apparition bord sur bord et l'apparition bord sur centre. L'expérience négative d'Arago lui permet seulement de déclarer une différence d'éclat de moins de $1/40$, soit comme 41 à 40 entre le centre et le bord, très en deçà de la différence de 48 à 30. Une nouvelle épreuve utilisant cette fois la polarisation chromatique, obtenue en interposant une lame de cristal de roche entre le spath et l'objectif, ne montre aucune coloration dans la zone de recouvrement des deux images solaires, indiquant par là une différence des intensités entre bord et centre à laquelle l'œil ne peut être sensible. Il est clair que les méthodes et les instruments utilisés par Arago, pour ingénieux qu'ils soient, n'offrent pas la sensibilité suffisante pour mesurer une variation d'intensité, selon les estimations modernes, de 1% de l'intensité totale.

La question de l'assombrissement bord-centre du Soleil trouvera finalement une réponse par « l'étude comparative des propriétés photogéniques des rayons lumineux partant du bord et des rayons lumineux du centre du Soleil. »¹⁸⁶ L'étude utilisera une nouvelle invention de ce siècle, à la diffusion de laquelle travaillera activement Arago : le *daguerriotype*¹⁸⁷. Sous la Monarchie de juillet, Arago est une figure morale et scientifique de premier plan. Il use de cette autorité pour présenter à la Chambre des députés un rapport sur le daguerriotype et demander au gouvernement d'assurer une confortable pension aux inventeurs du procédé et à leurs ayants-droit : Isidore Niépce, fils de Nicéphore Niépce, le premier inventeur et Louis Daguerre, le second inventeur. Moyennant quoi, l'État devenu propriétaire de l'invention pourra l'offrir au Monde, selon les souhaits d'Arago¹⁸⁸. Le succès du daguerriotype est immédiat tant dans le public que dans la communauté scientifique. Les nombreuses images du disque solaire, réalisées par Hippolyte Fizeau (1819-

186. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 247.

187. Sur l'invention du daguerriotype, voir Jean-Louis Marignier, *Nicéphore Niépce, 1765-1833. L'invention de la photographie*, coll. *Un savant, une époque*, Jean Dhombres (dir.), Paris, Belin, 1999.

188. F. Arago, « Le daguerriotype », *CRAS*, 1839, tome 9, n° 8, p. 250-267.

1896) et Léon Foucault (1819-1868) en 1844 et 1845 montrent sans discussion une action photogénique plus forte des rayons provenant du centre que de ceux provenant des bords de l'astre, confirmant ainsi les observations de Bouguer¹⁸⁹. Pour la photométrie, c'est un nouveau moyen consistant à mesurer l'intensité de la lumière par ses effets photogéniques, plus précisément par la mesure des temps d'exposition. Il assure aussi la conservation des observations, permettant leur exploitation en « temps différé ». Fizeau et Foucault vont ainsi réaliser plusieurs épreuves, en diminuant progressivement les durées d'exposition à la lumière du disque solaire, montrant clairement la disparition progressive des bords de l'étoile au fur et à mesure que le temps d'exposition diminue.

À l'évidence, le photomètre d'Arago et sa lunette polariscope ne sont pas destinés à la comparaison pratique des sources lumineuses usuelles. L'astronome parisien avait d'ailleurs clairement exprimé ses doutes sur la possibilité de la comparaison photométrique des sources à flamme dont l'intensité est bien trop changeante pour permettre des mesures tangibles. Sans doute cela explique-t-il pourquoi Arago n'a consacré à cette dernière question que quelques pages placées en appendice du tome 10 de ses œuvres et rassemblées sous le titre « Sur les intensités comparatives de diverses sources lumineuses »¹⁹⁰. Encore une bonne partie de ce texte rend-il surtout compte des expériences de William Thomas Brande (1788-1866) sur le pouvoir éclairant de différents gaz¹⁹¹, mesures effectuées en utilisant un photomètre à ombres de Bouguer-Rumford.

À l'inverse, les instruments imaginés par Arago et réalisés par les meilleurs artistes sont des instruments de haute technologie, conçus pour l'équipement d'un observatoire ou d'un laboratoire de recherche. Cette recherche commencée par les travaux de Malus et d'Arago sur la polarisation, de Biot sur la polarisation rotatoire et de Fresnel sur l'optique ondulatoire inaugure une nouvelle branche de l'optique que l'on appellera un temps la *haute optique*, avant qu'elle ne devienne l'optique physique. Ces travaux produisent une belle moisson de découvertes : la transversalité de l'onde lumineuse se trouve quasiment établie par Fresnel (en dépit des hésitations d'Arago) ; l'analyse chimique se trouve enrichie d'une nouvelle technique, la polarimétrie au dé-

189. Voir la reproduction du cliché obtenu par Fizeau et Foucault dans le tome 2 de *l'Astronomie populaire*, 2^e édition, 1865, p. 177. La légende précise un temps d'exposition de 1/60^e de seconde.

190. F. Arago, *Œuvres*, tome 10, p. 494-501.

191. W. T. Brande, « The Bakerian Lecture. On the composition and analysis of the inflammable gaseous compounds resulting from the destructive distillation of coal and oil, with some remarks on their relative heating and illuminating powers. », *Phil. Trans.*, 1820, vol. 110, p. 11-28.

veloppement de laquelle travaille activement Biot. Les techniques de la photométrie profitent également de ce courant porteur : la polarisation rend plus sensible la gradation de la lumière et la loi du cosinus carré facilite la lecture précise de l'intensité lumineuse. Dans cette première moitié du siècle, une autre invention, le daguerréotype ajoute à l'instrumentation photométrique une méthode de mesure de l'intensité lumineuse par ses effets « photogéniques ». Comme pour contredire les propos tenus en 1833 par le Secrétaire perpétuel¹⁹², la photométrie utilise désormais les « technologies de pointe ».

192. En 1830, l'Académie élit Arago pour cette prestigieuse fonction, en remplacement de Joseph Fourier, après le décès de ce dernier.

Chapitre 3

Nouvelles lumières (1800-1850)

L'éclairage au gaz et l'arc voltaïque

Lorsque la première moitié du siècle s'achève, grâce en partie aux efforts déployés par Arago, l'instrumentation photométrique s'est enrichie de méthodes innovantes : les mesures peuvent désormais s'effectuer en lumière polarisée que l'on sait produire et utiliser de façon avantageuse avec différents composants : piles de glaces, lames de cristal de roche, prisme de Nicol, biprisme de Rochon. Les pointés photométriques peuvent se ramener à deux mesures précises d'angles, mesures parfaitement maîtrisées à l'époque ; l'utilisation de la loi du cosinus carré, démontrée expérimentalement par Arago, détermine ensuite le rapport de l'intensité inconnue à celle de la source de référence. Ces méthodes restent néanmoins coûteuses, pour ne pas dire élitistes et leur utilisation se restreint au domaine de la recherche fondamentale. Mais l'astronome qui, en 1833, avait déploré devant l'Académie des sciences, l'absence de progrès significatifs dans ce domaine particulier de l'optique peut s'estimer satisfait. Pour autant, la photométrie pratique, celle qui s'applique à l'expertise des moyens d'éclairage usuels semble en être restée au même degré de rusticité que la plupart de ces luminaires. Faute d'étalon, on se contente d'exprimer leur lumière en « bougies » ou en « quinquets » et les intensités lumineuses dépendent autant des caprices de flammes vacillantes et fumeuses que de la versatilité des impressions de l'observateur.

Les choses ne vont pas rester en l'état et la simplicité des ustensiles d'éclairage ne doit pas faire penser qu'ils ne font partie que de la sphère privée (le logis, le feu, le foyer), ils se déploient aussi sur le domaine public des espaces urbains, déploiement initié, selon la tradition historique, d'abord à Paris, par l'ordonnance de 1667, puis dans les villes de province par l'édit royal de 1697. Mais la distribution reste très inégale, révélant dans le royaume les solutions de continuité entre villes et campagnes, centres-villes illuminés et faubourgs soumis aux ténèbres, la nuit tombée... Sophie Reculin a donné une

analyse précise, entre volonté royale, exprimée par les mots de La Reynie : « netteté, clarté et sûreté »¹ et résistances des populations, du déploiement de l'éclairage public dans plusieurs cités provinciales et des progrès apportés par le remplacement de la lumière souffreteuse des lanternes par celle plus vigoureuse des réverbères à réflecteurs². Mais des bouleversements techniques d'une autre ampleur attendent les villes à la naissance d'un nouveau siècle. « l'Ancien régime nocturne »³ qui régent le sommeil et impose le couvre-feu ne peut résister à l'avènement de nouvelles sources de lumières : l'éclairage au gaz apprivoisant des ténèbres redoutées où l'on n'osait s'aventurer seul et « l'arc voltaïque » si puissant qu'il étend sa lumière sur de vastes étendues et permet le travail de nuit sur les chantiers. Les grands travaux d'assainissement et d'embellissement des villes s'en trouveront d'autant accélérés. La nouveauté et le progrès de ces inventions résident dans la possibilité de stocker (au moyen de gazomètres et de générateurs électriques) l'énergie lumineuse et de la transporter dans un réseau desservant les voies publiques et les usagers qui lui sont connectés.

Ces facilités vont ainsi donner naissance en Angleterre à une industrie gazière que l'augmentation du nombre de consommateurs va vite rendre prospère⁴. En France, si les débuts sont plus timides, l'interventionnisme qui s'est manifesté déjà en vue de l'éclairage des côtes du royaume, entre aussi en scène pour que soit assurée la mise en lumière des villes et l'accès des populations à cette nouvelle énergie lumineuse. C'est d'abord le roi Louis XVIII lui-même qui investit dans la jeune industrie qu'il souhaite encourager : il participe, sur sa liste civile, au capital de la Société royale qui prendra notamment en charge l'illumination de l'Opéra. La cour suit son exemple et de nombreuses installations privées voient le jour, initiatives accompagnées parfois de quelques faillites retentissantes. C'est aussi le lancement de chantiers importants : Chabrol (Gilbert Joseph Gaspard, comte de Chabrol de Volvic, 1773-1843), le préfet de la Seine projette en 1815 la mise en lumière de l'hôpital Saint-Louis. Ancien élève de l'École centrale des travaux publics (l'École polytechnique), le haut fonctionnaire fait jouer son réseau de poly-

1. Gabriel Nicolas de La Reynie (1625-1709), premier lieutenant général de police de Paris.

2. Sophie Reculin, *"Le règne de la nuit désormais va finir". L'invention et la diffusion de l'éclairage public dans le royaume de France (1697-1789)*, Thèse, Université Charles de Gaulle-Lille 3, 2017.

3. Simone Delattre, *Les douze heures noires. La nuit à Paris au XIX^e siècle*, Paris, Albin Michel, 2000.

4. Lire à ce sujet les deux études de Malcolm Edward Falkus : « The Early Development of the British Gas Industry, 1790-1815 », *The Economic History Review*, 1982, vol. 35, n° 2, p. 217-234 et « The British Gas Industry before 1850 », *The Economic History Review*, 1967, vol. 20, n° .3, p. 494-508.

techniciens de l'an III : le physicien et chimiste Charles Cagniard de Latour (1777-1859), le mathématicien Louis Poinsot (1777-1859) auxquels se joint le chimiste et industriel Jean-Pierre-Joseph d'Arcet (1777-1844). Le projet se verra réalisé en 1818⁵.

Les débuts de l'industrie gazière et la diffusion rapide de la nouvelle technologie en France et en Europe sont aujourd'hui l'objet d'une historiographie abondante, avec notamment les travaux de Jean-Pierre Williot et Serge Paquier⁶. Pour autant, les recherches consacrées à cette aventure industrielle restent surtout centrées sur la montée en puissance des moyens de production, l'implication des acteurs privés, la nature des traités entre les compagnies du gaz et les collectivités publiques et la création des réseaux de distribution. Or le gaz est un produit issu de gisements de matières premières très divers. Sa distribution au service de l'industrie, des municipalités et des particuliers soulève une autre problématique : l'appréciation de sa qualité. Celle-ci peut s'évaluer par une notion nouvelle : le « pouvoir éclairant ». Samuel Clegg, spécialiste reconnu de la question, résume ici parfaitement l'importance que la photométrie sera amenée à prendre dans ce nouveau domaine industriel :

Pendant longtemps, la détermination de l'intensité relative de deux flammes n'a été qu'un problème scientifique ; mais elle a pris un haut degré d'importance pratique, depuis que les actes récents du Parlement[britannique], concernant l'éclairage au gaz, ont fixé le pouvoir éclairant auquel il doit satisfaire.⁷

L'histoire des sciences et des techniques a peu évoqué, jusqu'à présent, les travaux qui pendant le premier XIX^e siècle ont abouti à la création d'une photométrie industrielle. Il a semblé opportun de combler cette lacune et de s'intéresser à la mise en place, pendant cette période, des méthodes physico-chimiques et des contrôles photométriques dans l'industrie gazière naissante.

La première section de ce chapitre décrit les premiers instruments dévolus à la mesure du pouvoir éclairant des différents gaz d'éclairage (gaz d'huiles

5. *L'industrie du gaz en France*, édité à l'occasion du cinquantième de la Société technique de l'industrie du gaz, 1924, p. 53.

6. Jean-Pierre Williot, Serge Paquier, « Origine et diffusion d'une technologie nouvelle au XIX^e siècle » in *L'industrie du gaz en Europe aux XIX^e et XX^e siècles L'innovation entre marchés privés et collectivités publiques*, Euroclio, n° 20, Bruxelles, Peter Lang, 2005, p. 21-53 et Jean-Pierre Williot, *Naissance d'un service public : Le gaz à Paris au XIX^e siècle*, Paris, Éditions Rive Droite, 1999.

7. Samuel Clegg, *Traité pratique de la fabrication et de la distribution du gaz d'éclairage et de chauffage*, traduction de l'anglais par Ed. Servier, Librairie scientifique, industrielle et agricole, Lacroix et Baudry, Paris, 1860, p. 277.

et de houille). Plusieurs conceptions sont en discussion : la méthode visuelle de Bouguer, fondée sur l'égalité des ombres⁸ et une approche purement physique, défendue par Leslie qui s'attache à absorber la lumière par un corps noir pour la convertir en chaleur. Or le pouvoir éclairant peut se concevoir comme la capacité que possède une source lumineuse de rendre les objets visibles et les caractères d'imprimerie lisibles. Les instruments de la photométrie pratique doivent donc rendre compte d'une sensation visuelle avec une précision que détermine la sensibilité de l'œil. Cette nécessité bat en brèche la revendication de Leslie de relier l'indication de son « photomètre » à un principe physique et d'atteindre à la « précision géométrique si précieuse dans les sciences » (supra, p.95). Sera aussi évoquée une instrumentation fondée sur l'analyse chimique du gaz pour connaître sa teneur en carbures d'hydrogène, réputés pour leur participation au pouvoir éclairant.

La deuxième section s'intéresse au prix d'une lumière qui n'est pas seulement fonction des mesures des photomètres. Sa valeur est fixée par les retours sur investissement des installations d'éclairage au gaz mais aussi à l'huile lampante. La rentabilité de la filière s'évalue par des expertises en amont, confiées aux meilleurs spécialistes de l'époque, recrutés tant dans le milieu académique que parmi les ingénieurs civils.

La mise en place dans l'industrie gazière de ce qu'il est coutume d'appeler aujourd'hui le « contrôle de qualité » est étudiée dans la troisième section. Si l'intervention de la puissance publique est nécessaire, ne fût-ce que pour définir et autoriser sous la voirie le passage des réseaux de distribution du gaz, à l'Administration revient aussi le soin d'établir le cahier des charges et les obligations des manufacturiers. Les contrôles nécessaires ne peuvent se faire que dans des laboratoires municipaux ou nationaux. Les photomètres doivent se montrer capables de déterminer l'efficacité lumineuse de chaque brûleur et de la mettre en perspective avec la dépense et le type de combustible employé. La photométrie s'invite dans une expertise technologique. Le traité conclu entre la Ville et la Compagnie parisienne conduit ainsi en France à l'établissement d'une première norme industrielle, avec les encouragements du nouveau régime impérial, très impliqué dans l'industrialisation du pays.

La lumière de l'arc électrique devra attendre le second XIX^e siècle et la maturité industrielle des générateurs qui la produisent, pour prétendre à un emploi primordial pour l'éclairage des grands espaces, notamment maritimes (les phares). Cette lumière particulière va, en attendant, susciter l'intérêt du monde scientifique. Quelle relation se noue-t-il entre la lumière, le fluide

8. Le choix est fait ici d'appeler cette méthode « photoscope » car elle utilise une sensation visuelle et de l'attribuer, non pas à Rumford, mais à Bouguer qui, le premier, a réalisé l'expérience.

électrique et la chaleur, ces trois agents physiques impliqués dans l'arc voltaïque ? Il a semblé important dans la quatrième section d'évoquer les travaux entrepris en Europe sur cette question de physique fondamentale, mais pour laquelle la photométrie reste un problème connexe.

En effet, comme le souligne Antoine Philibert Masson (1806-1860), répondre à cette question suppose l'acquisition d'une quantité suffisante de données, à l'aide d'instruments adaptés. La méthode de photométrie électrique, inventée par Masson a probablement permis l'une des premières expérimentations de mesures d'intensités sur des lumières brèves. L'évocation qui en est faite ici, dans la cinquième section, semble inédite et mérite de conclure ce chapitre.

3.1 Oil gas vs coal gas

Photoscope de Bouguer vs photomètre de Leslie

La fabrication du gaz d'éclairage, à ses débuts, utilise selon les régions, diverse sources de matières premières. Le gaz d'huile (« *oil gas* ») s'obtient ainsi par la distillation d'huiles de différentes provenances : au Royaume-Uni on utilise abondamment les ressources pélagiques : les huiles de poissons et celles tirées du lard provenant de l'équarrissage des mammifères marins, pourchassés sans états d'âme. Sous le crâne des malheureux cétacés, se trouve également une substance blanchâtre, le spermaceti (ou blanc de baleine), utilisée à la fabrication des bougies réservées à une clientèle fortunée. En France, les huiles proviennent surtout du pressage des graines et fruits des plantes oléagineuses : huiles d'olive et surtout de navette et de colza abondamment cultivés dans les départements du nord et de l'est. Le gaz de houille, appelé « *coal gas* » en Grande Bretagne est, quant à lui, tiré des sources fossiles terrestres : le charbon de terre (la houille), très abondant au Royaume-Uni, mais aussi la tourbe et le lignite. L'utilisation des gaz ainsi produits et leur pouvoir éclairant sont fortement conditionnés par leur provenance et leur composition. La nouvelle industrie se trouve liée à l'essor des méthodes d'analyses physico-chimiques dans une temporalité qui rejoint celle de la chimie du carbone⁹. Il sera intéressant de constater que le contrôle de qualité effectué sur le gaz manufacturé place en concurrence les méthodes de la photométrie avec les méthodes chimiques d'analyse ; la mesure du pouvoir éclairant, grandeur par essence visuelle met en compétition le photomètre avec l'eudiomètre¹⁰. La chimie du gaz d'éclairage croise ainsi l'histoire de la photométrie, ren-

9. Voir Bernadette Bensaude-Vincent, *Carbone. Sa vie, ses œuvres.*, Paris, Éditions du Seuil, 2018.

10. Instrument servant en chimie à l'analyse des gaz.

contre peu documentée dans l'histoire technique de l'industrie gazière et qui mérite ici une attention particulière.

En France, la tradition date l'origine de cette histoire au 17 fructidor an VII (1798-1799), quand Philippe Lebon dit d'Humbersin (1765-1805) dépose un brevet d'invention intitulé : « Nouveaux moyens d'employer les combustibles plus utilement, soit pour la chaleur, soit pour la lumière, et d'en recueillir les divers produits »¹¹. Lebon y annonce la possibilité de transporter la lumière par le gaz et le moyen

de gouverner à tel point le principe qui produit et de la lumière et de la chaleur (le gaz inflammable ou hydrogène) que l'on pût à son gré, le recueillir, soit pour le destiner aux aérostats, soit pour tout autre usage, le distribuer et lui faire porter à toute distance la lumière et la chaleur.

La démonstration en est faite en 1801 par l'illumination de sa propre maison, l'Hôtel Seignelay à Paris. L'appareil de Lebon, baptisé « thermolampe » utilise la pyrogénéation, c'est à dire la décomposition par chauffage à haute température, du bois en vase clos. Le procédé fournit plusieurs produits qui peuvent se classer par volatilité décroissante : en premier, un mélange gazeux, le gaz de bois, que Lebon appelle « hydrogène carburé », composé pour l'essentiel de monoxyde de carbone, de dihydrogène et de gaz des marais (ie le méthane). Puissant réducteur et très toxique, le monoxyde de carbone brûle heureusement dans l'air avec une flamme plutôt pâle, tout comme l'hydrogène ; en second, un condensat liquide formé d'huile, d'un acide que Lebon qualifie de « pyroligneux » et de goudrons utiles au calfatage des coques des navires ; enfin un solide composé essentiellement de carbone, le charbon de bois. Lebon publie en 1801 le résultat de ses travaux dans un rapport¹² qui sera traduit par un Allemand émigré en Angleterre, Frédéric Albert Winzler qui se fait appeler Winsor (1763-1830). Simultanément, en Angleterre, William Murdoch (1754-1839) mise sur la houille, ou charbon de terre, en lieu et place du bois. Avec l'appareil construit par ses soins dans les ateliers de Boulton & Watt¹³, il réalise l'illumination de la fonderie de Soho¹⁴, à l'occasion de la paix d'Amiens, signée en 1802 et il assure pendant l'hiver

11. Le document est conservé dans la base de données *Brevets français du 19^e siècle* de l'INPI.

12. P. Lebon, *Thermolampes ou poêles qui chauffent ; éclairent avec économie, et offrent, avec plusieurs produits précieux, une force motrice applicable à toutes espèce de machines ; inventés par Philippe Lebon, ingénieur des Ponts et Chaussées*, Paris, Charles Pougens, 1801.

13. Matthew Boulton (1728-1809) et James Watt (1736-1819).

14. Soho est un quartier situé dans la ville de Smethwick, à côté de Birmingham.

1807-1808, la fourniture d'un gaz permettant l'éclairage de l'usine de coton de MM. Philips et Lee, à Manchester. Les performances du nouveau moyen d'éclairage ont été précisément évaluées « par une comparaison des ombres » :

*The total quantity of light used during the hours of burning, has been ascertained, by a comparison of shadows, to be about equal to the light which 2500 mould candles of six in the pound would give; each of the candles, with which the comparison was made consuming at the rate of 4-10ths of an ounce (175 grains) of tallow per hour.*¹⁵

Si Murdoch ne s'étend pas d'avantage sur une comparaison photométrique qui apparaît comme un détail de son étude, c'est qu'il n'a en tête que l'économie apportée par le gaz, par rapport à la consommation de chandelles de suif, pour une vaste surface d'éclairage, celle d'un atelier industriel. Dans sa publication de 1808, Murdoch relate que ses recherches remontant à seize années lui ont permis d'apprécier plusieurs combustibles, bois, tourbe et charbon de terre, ce dernier produisant le *gaz light* dont la flamme est la plus éclairante. L'importance du projet réalisé à Manchester permet à Murdoch de revendiquer la paternité de l'utilisation commerciale du gaz d'éclairage, tout en rappelant les premières expériences de John Clayton (1657-1725) sur le *Spirit of Coals*, expériences réalisées bien avant l'année 1739, date de la publication dans les *Philosophical Transactions* de la lettre adressée par Clayton à Robert Boyle¹⁶. Sans doute le rappel de ces dates permet-il à Murdoch de situer son pays comme celui qui a vu naître l'invention du gaz d'éclairage, en ignorant les travaux de Lebon dont il aurait pourtant été informé par l'un des fils de Watt¹⁷. Une chose apparaît certaine qui fait de Murdoch un fondateur : cette première utilisation du *coal gas* aura scellé le sort des hydrocarbures fossiles.

Demandeuse de financements, la nouvelle industrie mobilise aussi le monde scientifique : la chimie s'étoffe d'une nouvelle branche, la carbochimie. L'exploitation du charbon géologique s'effectue dans des manufactures selon des procédés complexes. Les ingénieurs chimistes doivent rechercher des processus de valorisation ou d'élimination pour les sous-produits de la distillation de la houille. Celle-ci est chargée dans un ensemble de six à sept cornues en

15. William Murdoch, « An Account of the Application of the Gas from Coal to economical Purposes. », *Phil. Trans.*, 1808, vol. 198, p. 124-132.

16. John Clayton, « An Experiment concerning the Spirit of Coals, being part of a Letter to the Hon. Rob. Boyle, Esq; from the late Rev. John Clayton, D. D. communicated by the Right Rev. Father in God Robert Lord Bishop of Corke to the Right Hon. John Earl of Egniont, F. R. S. », *Phil. Trans.*, 1739, vol. 41, p. 59-61.

17. *L'Industrie du gaz en France*, Cinquantenaire de la Société technique de l'industrie du gaz, 1924, p. 44.

fonte de fer ou en terre, chauffées dans un fourneau. Pendant le processus de pyrogénéation, le soufre présent dans le combustible se combine à l'hydrogène et au carbone pour donner le « gaz sulfhydrique » et le sulfure de carbone¹⁸, dont il convient de se débarrasser « à cause de l'influence fâcheuse que ces gaz peuvent exercer sur l'économie animale. »¹⁹ Il faut séparer les constituants du condensat liquide, en extraire ceux présentant une quelconque valeur. Il faut aussi déterminer la nature du gaz dont la combustion détermine la brillance de la flamme et conséquemment la valeur de la houille utilisée. Outre le gaz réservé au chauffage et à l'éclairage, cette filière industrielle produit le coke utile à la métallurgie, les goudrons pour les chantiers navals, des huiles aux usages divers et quelques sous-produits toujours récupérables.

La rentabilité de la filière dépend évidemment de la facilité d'exploitation des bassins et de la qualité de la houille qui en est extraite. Les études géognostiques des territoires, menées en France et dans les autres pays européens ont permis de répertorier les gisements de charbon géologique, laissés au Carbonifère et ceux de bassins plus modernes (ceux de lignite notamment). Henri Victor Regnault (1810-1878), un jeune ingénieur des mines s'attaque à l'analyse chimique des échantillons prélevés dans les principaux gisements terrestres²⁰. « Tout comme les vins, les charbons sont des produits du terroir. Ils se définissent par leur lieu d'origine qui détermine leur usage. » remarquent avec justesse Bernadette Bensaude-Vincent et Sacha Loeve²¹. Regnault effectue ainsi les dosages du carbone, de l'hydrogène, de l'azote et de l'oxygène des houilles. On imagine que le pouvoir calorifique et le pouvoir éclairant du combustible sont proportionnels aux quantités d'hydrogènes carbonés²² qu'il contient. Il s'agit essentiellement de « l'hydrogène protocarboné », noté par Édouard Robert d'Hurcourt (1808-1884) H^4C et appelé « gaz des marais » car il émane des eaux stagnantes²³ et de « l'hydrogène bicarboné » ou « percarboné » que d'Hurcourt représente par la formule H^2C et appelé « gaz oléifiant »²⁴. La synthèse *in vivo* de ces composés formés de carbone et d'hydrogène semble encore mystérieuse : en l'absence de procédés artificiels

18. Le « gaz sulfhydrique » est dénommé à présent sulfure d'hydrogène, composé de formule H_2S . Le sulfure de carbone CS_2 est un liquide très toxique, extrêmement volatil.

19. Édouard Robert d'Hurcourt, *De l'éclairage au gaz*, Carilian Goeury et Victor Dalmont, Paris, 1845, p. 3.

20. V. Regnault, « Recherches sur les combustibles minéraux », *Annales des mines*, 1837, sér. 3, tome 12, p. 151-240.

21. B. Bensaude-Vincent, S. Loeve, [BVL18], p. 151.

22. On dira aujourd'hui « hydrocarbures »

23. Il correspond au méthane CH_4 , premier terme de la série des alcanes ou hydrocarbures aliphatiques saturés.

24. Il s'agit de l'éthylène, C_2H_4 , premier terme de la série des alcènes ou hydrocarbures aliphatiques insaturés. Ces composés sont aussi appelés oléfines.

permettant la réunion de ces deux éléments, on y voit l'intervention d'un agent hypothétique, la « force vitale », inhérente aux tissus des animaux et des végétaux²⁵. La chimie organique, c'est à dire la chimie des composés du carbone et de l'hydrogène, issu du travail de la « force vitale » va donc suivre les progrès de l'industrie du charbon et tenir une place de plus en plus importante dans l'enseignement de la chimie, à preuve le tome IV du cours de Regnault qui lui est consacré en totalité²⁶.

Parmi les essais de laboratoire, envisagés pour apprécier la qualité éclairante d'un gaz figure au premier chef son analyse chimique, mais aussi les mesures de propriétés physiques, comme la densité. Des études précoces, dont celles de William Henry (1774-1836) en Angleterre²⁷ se sont consacrées à l'identification des composés hydrocarbonés, responsables de la puissance illuminatrice du gaz d'éclairage. L'ambition de Henry est la mise en évidence de lois simples entre la composition chimique des gaz et leur pouvoir éclairant. La méthode analytique du chimiste de Manchester utilise un eudiomètre de Volta, instrument permettant de mesurer la variation de volume d'un mélange gazeux, suite à la réaction chimique des gaz emprisonnés dans l'appareil. Une étincelle électrique déclenche une combustion explosive dans le cas d'un mélange d'oxygène et du gaz en question. Henry en tire cette première loi : « *The light is greater, the more oxigen is required for the combustion.* ». Cette réaction se révèle particulièrement violente avec le gaz qu'il est coutume d'appeler le « gaz oléfiant » auquel Henry attribue de puissantes vertus éclairantes :

*Above all others, the olefiant gas is decidedly entitled to rank, by the splendor and beauty of the light which it yields; and the violence of its detonation, when fired with a mixture of oxigen gas, also surpasses that of every other inflammable gas.*²⁸

25. Voir à ce sujet Samuel Clegg, [Cle60], p. 29 et les travaux de Roselyne Rey (1951-1995), en particulier : *Naissance et développement du vitalisme en France de la deuxième moitié du dix-huitième siècle à la fin du premier empire*, thèse, université Paris 1, 1987.

26. V. Regnault, *Cours élémentaire de chimie à l'usage des facultés, des établissements d'enseignement secondaire, des écoles normales et des écoles industrielles*, Bruxelles, Auguste Pagny, 1851.

27. W. Henry, « Description of an Apparatus for the Analysis of the Compound Inflammable Gases by slow Combustion with Experiments on the Gas from Coal, explaining its Application. », *Phil. Trans.*, 1808, p. 282-303.

28. W. Henry, « Experiments on the Gases obtained by the destructive Distillation of Wood, Peat, Pit-Coal, Wax, &c. with a View to the Theory of their Combustion, when employed as Sources of artificial Light; and including Observations on Hydro-Carburets in general, and the Carbonic Oxide », *Journal of Natural Philosophy, Chemistry & the Arts*, 1805, vol. 11, p. 65-74.

Le gaz oléfiant, désigné aussi par Henry *super-carburated hydrogen* a la propriété de se combiner avec l'« acide muriatique oxygéné », qui n'est autre que le chlore, pour conduire à un liquide gras, appelé « huile des Hollandais »²⁹. Henry peut ainsi vérifier dans l'eudiomètre que les gaz issus respectivement de la distillation de la cire et de la distillation du suif contiennent respectivement $\frac{1}{8}$ et $\frac{1}{4}$ de gaz oléfiant, le reste étant constitué de carbures d'hydrogène avec lesquels réagit aussi le chlore sous l'effet de la lumière diffuse. La condensation du gaz oléfiant et des vapeurs carburées par le chlore apparaît ainsi, dans une première approche, comme une mesure de la puissance illuminante des gaz issus de diverses distillations. De toutes les méthodes analytiques, elle est, selon Clegg, « la meilleure pour déterminer le pouvoir éclairant du gaz, lorsqu'on n'a pas recours à la comparaison directe des intensités »³⁰. Un autre chimiste écossais, Andrew Fyfe (1792-1861) affirme :

*I have already stated, that oil and coal gas, after being properly purified, are nearly of the same composition, their ingredients being hydrogen, carbonic oxide, carburated hydrogen, and olefiant gas, the last of which is almost the only source of light, and, in proportion as it varies in quantity, the illuminating power also varies. If this opinion be correct, we have merely to find the proportion of olefiant gas, and we have at once the relative power of illumination.*³¹

Cette présomption s'appuie sur les essais réalisés par Fyfe en vue de la comparaison du gaz d'huile — il s'agit d'huile de baleine — et du gaz de houille par la méthode directe (*consumpt*) et par le test de la condensation par le chlore (*chlorine*). La méthode photométrique de Fyfe est traditionnelle et procède par l'égalisation visuelle des ombres fournies par les deux lumières. Il faut deux essais : une première comparaison photométrique attribue au gaz d'huile un pouvoir éclairant équivalent à celui de 8 bougies dites *short sixes*³² ; une seconde comparaison conduit pour le gaz de houille (produit par la manufacture d'Edinburgh) à un pouvoir éclairant équivalent à celui de 4,69 bougies, ce qui donne un rapport de 1 à 1,7 en faveur du gaz d'huile. Les chiffres de Fyfe (voir fig.3.1) montrent des résultats équivalents pour la méthode photométrique et pour la méthode chimique, ce qui amène l'Écos-

29. L'addition d'une molécule de dichlore sur la double liaison éthylénique conduit à la formation de ce composé huileux, le dichloro 1-2 éthane.

30. Samuel Clegg, [Cle60], p. 278.

31. A. Fyfe, « On the Illuminating power of Coal-Gas and Oil-Gas. », *The Edinburgh Philosophical Journal*, 1824, vol. 11, p. 367.

32. Chaque bougie a une masse de un sixième de livre ou 453,6 g.

sais à montrer sa préférence pour cette dernière et ses doutes vis à vis d'une évaluation suffisamment précise par l'égalité des ombres :

*In having recourse to this test, we are saved the trouble of measuring the consumpt of the gases, and avoid also the uncertainty as to the intensity of the shadow, for unless we are accurate in this, it is impossible to ascertain, with any degree of certainty, the power of giving light. (...) Perhaps it will be best to state it just as the quantity of olefiant gas, that is, if the gas contains 15 per cent., let its illuminating power be termed 15, and so on, according to the proportion.*³³

By the Consumpt.	By the Chlorine Test.
as 1 to 1.9	as 1 to 1.8
1 to 1.8	1 to 1.6
1 to 1.4	1 to 1.6
1 to 1.35	1 to 1.36

fig. 3.1 – A. Fyfe, « On the Illuminating power of Coal-Gas and Oil-Gas. », *The Edinburgh Philosophical Journal*, 1824, vol.11, p. 372.

Mais l'espoir conçu par Fyfe de comparer simplement les pouvoirs éclairants à partir de la réaction de chloration du gaz oléfiant est vite déçu par les écarts, pour ne pas dire les divergences, constatés dans d'autres expertises entre les mesures directes (photométriques) et les estimations reçues des analyses chimique et densitométrique. Ces dernières ne peuvent constituer une mesure de la puissance éclairante mais doivent plutôt être prises en compte comme les indices menant à une prévision de la richesse en principes éclairants des gaz manufacturés, prévision jugée suffisamment pertinente par d'Hurcourt :

Faute de moyens plus parfaits, nous sommes cependant portés à admettre la condensation par le chlore, comme représentant avec une approximation suffisante pour la pratique la puissance éclairante d'un gaz ; car cette condensation n'est autre chose que la mesure des matières réellement illuminantes.³⁴

Et pour ce qui concerne les mesures densitométriques, ce dernier ajoute :

33. A. Fyfe, *ibid.*, p.372.

34. E. Robert d'Hurcourt, [d'H45], p. 34.

(...) comme les gaz condensés sont les plus pesants , on sera conduit à prendre la densité, comme représentant approximativement la puissance éclairante du gaz . On ne saurait en conclure que cette densité soit une mesure, car dans des circonstances particulières, on peut être conduit de cette manière à des conséquences diamétralement opposées aux résultats de la pratique...³⁵

Les circonstances particulières sont évidemment la présence d'acide carbonique (le dioxyde de carbone) et d'autres composés ne participant pas à la combustion. Et d'Hurcourt de conclure : « Nous le répétons, ce genre d'évaluation ne peut être adopté que pour donner une idée de la richesse de gaz obtenus par des moyens analogues, et peut encore, de cette manière, rendre de grands services à l'industrie. »³⁶.

Comme le remarquent Robert Christison (1797-1882) et Edward Turner (1796-1837), deux autres professeurs d'Édimbourg, l'explication des divergences constatées ne peut faire l'économie d'une lecture attentive des phénomènes, à commencer, en premier, des conditions selon lesquelles les combustions du gaz de houille et du gaz d'huile ont été opérées, en second, des méthodes suivies pour la comparaison photométrique des pouvoirs éclairants des différents gaz³⁷. Pour les deux chercheurs, il est primordial, avant tout essai, de définir les principes présidant à la construction et au choix des brûleurs, si l'on veut éviter des écarts pouvant atteindre « un ratio extravagant de 10 à 14, voire 15 »³⁸. Et pour commencer, il faut aussi revoir les protocoles de mesure mis en œuvre chez les manufacturiers qui ont conduit, jusqu'à présent, à des différences inacceptables et, c'est l'essentiel, trouver le bon photomètre. Le choix est limité : comme l'indique la littérature, les ingénieurs de la nouvelle industrie connaissent principalement l'appareil de Leslie et le photomètre attribué à Rumford. Or les multiples essais de Christison et Turner rendent compte des insuffisances du « *thermometric photometer* » si fièrement présenté par Leslie. Les deux auteurs évoquent d'abord une sensibilité trop faible pour les mesures envisagées : les intensités lumineuses émises par la flamme des brûleurs ne dépassant pas le quart de celle émise par une bougie de suif, le déplacement du liquide dans le tube de l'instrument n'est

35. E. Robert d'Hurcourt, *ibid.*, p. 35.

36. E. Robert d'Hurcourt, *ibid.*, p. 35.

37. Robert Christison, Edward Turner, « On the Construction of Oil and Coal Gas Burners and the circumstances that influence the Light emitted by the Gases during their Combustion; with some Observations on their relative Illuminating Power, and on the different modes of ascertaining it. », *The Edinburgh Philosophical Journal*, Edinburgh, 1825, vol. 13, p. 1-39.

38. Voir R. Christison, E. Turner, *ibid.*, p. 3. Ces valeurs peuvent s'interpréter comme une variabilité des estimations de 40% à 50%.

pas significatif et peut résulter de causes indésirables. D'autre part, un temps de réponse prohibitif, de l'ordre de 40 minutes pour atteindre le maximum et revenir au zéro, rend le photomètre de Leslie inutilisable pour la comparaison des brûleurs à gaz d'huile et de houille, dans un contexte industriel. Enfin, les indications fournies par l'instrument sont biaisées en raison de sa sensibilité à la « chaleur non lumineuse ». Ainsi, le rayonnement émis par une pièce d'acier (un cylindre dans l'expérience rapportée par Christison et Turner, une boule selon le rapport de Ritchie), portée à la température du rouge sombre est censé, selon le photomètre de Leslie, offrir un pouvoir éclairant presque équivalent à celui d'une bonne lampe d'Argand.

William Ritchie (vers 1790-1837), un autre savant écossais publie, cette même année 1825, les résultats particulièrement argumentés de son expertise de l'instrument inventé par Leslie³⁹. Pour cet auteur, l'appareil ne permet même pas l'évaluation de l'intensité des rayons solaires car il ne peut se soustraire au rayonnement diffus de l'atmosphère ni à celui de la Terre. Mais l'étude de Ritchie va plus loin car il pose sans ambages la question fondamentale de la photométrie : que mesure-t-elle ?

*In the late discussion with regard to the relative values of coal and oil-gas, those who have employed Mr Leslie's photometer seem to have overlooked the distinction between the terms Quantity of light and Illuminating Power. By the former term, I would be understood to mean the number of atoms of light shooting out simultaneously from two luminous sources; by the latter, the power which these atoms possess of rendering external objects visible. The ratio of the former may be determined by a photometer founded on the expansion of air by its combination with light. The ratio of the later cannot be determined by any method which does not employ the indications of the extremely delicate photoscope, the eye, as one of the elements in the calculation.*⁴⁰

L'analyse de Ritchie distingue deux grandeurs fondamentales : la quantité de lumière que Ritchie définit comme le nombre « d'atomes de lumière émis par chaque source », que l'on peut traduire comme le « flux lumineux » et le pouvoir éclairant qui est la qualité que possèdent tous ces atomes de rendre les objets visibles. Ces deux grandeurs souvent confondues doivent s'évaluer

39. W. Ritchie, « On Leslie's photometer and its application to determine the relative Intensity of the Sun's Rays, and the Illuminating Powers of Coal and Oil Gas. », *The Edinburgh Journal of Science*, Edinburgh, William Blackwood, London, T. Cadell, 1825, vol ii, p. 321-325.

40. W. Ritchie, *ibid.*, p. 324.

avec deux instruments différents qu'il désigne par deux termes : *photometer* et *photoscope*, quand seul le premier d'entre eux était jusqu'alors consacré par l'usage. Cette distinction sémantique correspond plus profondément à deux conceptions différentes de la photométrie, alors que n'en prévalait qu'une auparavant : la première est l'approche visuelle, sur laquelle a été fondée la photométrie par Bouguer, puis Lambert et Rumford. Elle utilise l'œil comme un indicateur de zéro capable d'indiquer l'identité de perception entre deux lumières, l'une d'elles pouvant être choisie comme lumière de référence. La précision du pointé est améliorée par la recherche de l'identité des ombres d'une tige opaque, portées par les deux sources lumineuses, sur le champ d'observation. La résolution de la méthode, déterminée par Bouguer, atteint $1/64$ de l'intensité mesurée⁴¹. En plus de la méthode de l'égalisation visuelle, la photométrie peut aussi mettre à profit l'acuité visuelle, c'est à dire la capacité de l'œil à distinguer les détails des objets, capacité directement fonction, à fortiori, de l'intensité de l'éclairage ou du pouvoir éclairant des sources de lumière.

L'approche physique utilise, quant à elle, un instrument objectif, auquel Ritchie réserve le nom de « photomètre ». Il mesure l'amplitude d'un phénomène physique ou chimique relié par une loi plus ou moins simple au flux lumineux, rayonné par la source. Il s'agit, suivant par exemple l'idée de Leslie, de ramener la mesure de la lumière à celle d'une température. Mais l'instrument de Leslie s'apparente moins à un photomètre qu'à un thermomètre différentiel qui afficherait la différence des températures entre ses deux bulbes de verre. Leslie défend néanmoins le principe physique de son photomètre, comme il le fit pour son hygromètre, en opposition farouche avec les instruments fondés sur les propriétés hygroscopiques des substances organiques, qu'il qualifie de « simples jouets ». Mais faute d'une formalisation précise des principes de ses instruments, il ne fournit aucune indication sur la précision et la sensibilité qu'on peut attendre de ceux-ci. De plus, on doute qu'il soit possible, avec son photomètre, d'effectuer une comparaison valable de deux sources lumineuses dans le domaine visible, compte tenu de sa sensibilité constatée à la lumière non visible (les rayons infrarouges). Pour résoudre le problème causé par la présence de cette lumière dite « obscure », Ritchie, quant à lui, utilise le fait vérifié que cette dernière ne peut traverser le verre si son épaisseur est importante⁴². Il propose un instrument objectif, fondé aussi

41. P. Bouguer, *Traité*, p. 51-54.

42. Voir à ce sujet le compte rendu des expériences de François-Étienne Delaroché (1781-1813), « Observations sur le calorique rayonnant », *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, 1812, p. 201-228.

sur le principe que la lumière visible provoque, comme la chaleur, l'expansion des substances qui l'absorbent :

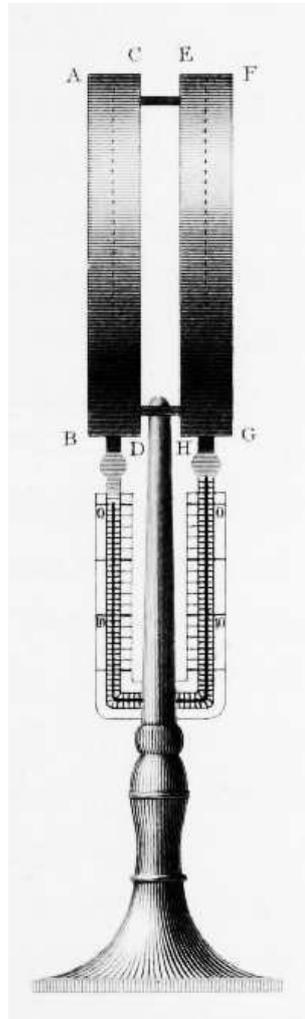


fig. 3.2 – Photomètre de Ritchie, « On a new photometer, with its application to determine the relative intensities of artificial light, &c.. », *Phil. Trans.*, London, 1825, vol. 11, p. 146.

*It is founded on the axiom, that equal volumes of air are equally expanded by equal quantities of light, converted into heat by absorption by black surfaces : and also on the well established principle that the quantity of light diminishes as the square of the distance of the luminous source from the object on which it is received.*⁴³

43. W. Ritchie, « On a new photometer, with its application to determine the relative intensities of artificial light, &c.. », *Phil. Trans.*, London, 1825, vol. 11, p. 142.

L'appareil est formé de deux cylindres minces $ABCD$ et $EFGH$ (figure 3.2), placés l'un face à l'autre, réalisés en étain ou en laiton. La face tournée vers l'extérieur qui scelle chaque cylindre est un disque taillé dans un verre épais. Son rôle est de laisser passer la lumière visible mais d'intercepter le « calorique invisible » qui l'accompagne. À l'intérieur de chaque boîte et à égale distance des bases est tendu un papier noir absorbant dont le rôle est de transformer intégralement en chaleur la lumière visible qu'il reçoit. L'expansion de l'air qui en résulte provoque le déplacement d'un liquide coloré, contenu dans le tube en U qui relie les deux cylindres. La comparaison des quantités de lumière fournies par deux brûleurs s'effectue en plaçant les deux flammes de part et d'autre de l'appareil, à une certaine distance de la face vitreuse de chacun des cylindres. La quantité de lumière fournie par un brûleur relativement à l'autre s'obtient par la comparaison des carrés des distances⁴⁴ pour lesquelles est atteint l'équilibre du liquide coloré, en remarquant que le liquide se déplace du côté de la source la plus faible.

L'instrument de Ritchie repose sur une méthode de zéro qui peut être extrêmement sensible. L'équilibre de l'index liquide entre les deux cylindres signifie que les éclairagements de chacune des surfaces noircies sont égaux et les flux émis par les deux sources dans le rapport des distances au carré. Mais l'analyse critique de Ritchie fait bien la distinction entre la quantité de la lumière et sa valeur visuelle et elle pose clairement la question de la relation entre les deux attributs, quantitatif et qualitatif, de la lumière. Or, dit-il, la méthode de Leslie repose sur le principe supposé que le pouvoir éclairant est proportionnel à la quantité de lumière, principe qui ne semble fondé que si les flammes en comparaison ont des couleurs semblables. Car, ajoute Ritchie : « (...) *when the colours are different, the illuminating power of the most brilliant light, increases in a much higher ratio than the mere quantity of light.* »⁴⁵ La comparaison de la flamme bleuâtre d'un gaz de houille de qualité médiocre avec la flamme éclatante d'un gaz d'huile d'excellente facture est sans appel : si l'appareil de Leslie fournit un rapport de un à cinq, on peut estimer, affirme Ritchie, que la première flamme n'atteint pas un vingtième du pouvoir éclairant de la seconde. L'Écossais se voit également obligé d'admettre que la comparaison des pouvoirs éclairants du gaz de houille et du gaz d'huile avec son propre instrument n'offre qu'un résultat approximatif, à moins que les couleurs des flammes ne soient rigoureusement identiques.

Le photomètre objectif qui utilise l'expansion de l'air par la conversion

44. Il faut les multiplier par les quantités de gaz consommées dans un temps donné : si q et q' sont les quantités de gaz consommées par les brûleurs dans le même temps, d et d' les distances mesurées, alors les intensités sont dans le même rapport que qd^2 à $q'd'^2$.

45. W. Ritchie, [Rit25b], p. 324.

de la lumière visible en chaleur ne donne accès qu'à la comparaison des flux lumineux de deux sources. Or il n'existe pas de relation simple, établie entre le flux lumineux et le pouvoir éclairant. La comparaison des pouvoirs éclairants de deux lumières doit donc utiliser un autre instrument fondé sur une comparaison visuelle, instrument que Ritchie appelle fort justement « photoscope », nom que l'usage ne gardera pas pour ne conserver que l'unique terme « photomètre ». L'« erreur » annoncée par Bouguer d'une « soixantième partie dans chaque comparaison de lumière » (supra p.41), permet d'espérer, pour ce deuxième instrument, une précision proche de 1,5%. C'est cette méthode qui trouve la faveur de Christison et Turner dans leur comparaison des becs d'éclairage car elle s'approche le plus de cette problématique de la vision qu'est la lecture, processus qui amène l'observateur à distinguer les objets éclairés par leur contour, les différences d'ombres et de contraste :

*Objects represented on a plane surface are distinguished in part by the difference of their colour ; but if their colours are simply black and white, as in a printed book, they are distinguished in reality by differences of shade. According as the light increases, whether in quantity or in intensity, or brilliancy, (to use Mr Ritchie's own phrase), the black objects remain equally dark, while the white objects become lighter and lighter, the contrast greater and greater, and the outlines of objects consequently more distinct. And hence it appears, that the method of measuring light by the comparative intensity of shadows is an exact criterion of the relative fitness of different lights for such purposes as reading, writing, sewing, pencil-drawing, &c. Farther, the eye likewise judges of the forms of solid objects by the relative shades of their different surfaces. On this account, too, the method of Count Rumford measures correctly the value of various lights.*⁴⁶

Dans le match Bouguer-Rumford vs Leslie, le « photoscope » de Bouguer-Rumford emporte la victoire d'autant mieux qu'il évalue l'intensité « sous le rapport par lequel la lumière artificielle est appliquée au plus grand nombre d'usages. »⁴⁷ Christison et Turner mesurant les pouvoirs éclairants des becs d'éclairage sont capables d'annoncer une précision de 1,4 %, voire une différence de $\frac{1}{80}$ des lumières comparées par la méthode des ombres égales, valeurs en accord avec la détermination de Bouguer et parfaitement acceptables dans le contexte de l'industrie des luminaires. Pourtant la robustesse

46. R. Christison, E. Turner, [CT25], p. 9-10.

47. R. Christison, E. Turner, *ACP*, 1827, tome 35, p. 314.

de cette méthode ne l'empêche pas de buter sur deux difficultés. La première, déjà signalée par Ritchie et confirmée par Christison et Turner, est la difficulté que présente la comparaison des ombres de couleurs différentes. Le jugement incertain ne permet pas la comparaison des pouvoirs éclairants des flammes pour des gaz de qualités différentes.

*But it has also been objected, and with a greater shew of reason, that, although the method is accurate when applied to lights of the same nature, it is not so when they differ much in colour, because the colours of the shadows differ, and the eye cannot abstract the difference of colour from the difference of shade.*⁴⁸

La seconde difficulté, rappelée par Christison et Turner est l'impossibilité pour le photoscope de fournir une indication sur une échelle fixe : sa détermination est relative et ne vaut que par rapport à une lumière standard dont le choix relève plus d'une facilité circonstancielle que d'une recherche approfondie. Le photoscope n'est pas un « instrument philosophique ». Les deux auteurs jugent que les bougies de suif (dont la flamme est trop sombre) ou de cire (qui conduisent à des comparaisons non reproductibles) souvent utilisées à cette fin ne peuvent fournir un standard légitime. La comparaison utilisera donc un brûleur de gaz d'huile dont la hauteur de flamme, fixée à 3 ou 4 pouces, doit être maintenue constante avec une tolérance de 1/20 pouce ($\approx 1,3$ mm). Cette tolérance est obtenue en utilisant un gazomètre fonctionnant selon le système de Girard (Philippe-Henri de Girard, 1775-1845) équipant ses lampes « oléostatiques ». Le gaz soumis à l'expertise est, quant à lui, fourni par un gazomètre analogue, permettant une détermination précise de la consommation.

À la question des différences chromatiques, qui restera pour la photométrie la question du siècle, les physiciens d'Édimbourg ne peuvent répondre que par des expédients expérimentaux, censés améliorer la précision du pointé photométrique. Si les différences entre les flammes sont faibles, en déplaçant la source mobile d'environ un pouce au plus, de chaque côté de la position où les ombres colorées sont supposées égales en brillance, l'observateur peut trouver petit à petit la position exacte, correspondant à l'égalité des ombres. En cas de différences excessives, il reste toujours possible d'effectuer une double comparaison à l'aide d'une flamme dont la brillance est intermédiaire entre la flamme de référence et la flamme du brûleur en examen. À ces amendements, Ritchie encore, apporte en 1826 un instrument fondé sur une nouvelle forme d'égalisation visuelle, en opposition complète avec la méthode

48. R. Christison, E. Turner, [CT25], p. 8.

« philosophique » de Leslie⁴⁹. L'instrument est une boîte rectangulaire, ou-

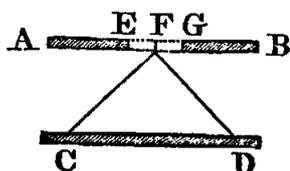


fig. 3.3 – Photomètre de Ritchie, « On a new Photometer, founded on the Principles of Bouguer. », *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, Edinburgh, 1826, vol. 10, p. 443.

verte sur les deux faces latérales AC et BD, pour laisser pénétrer la lumière provenant des sources. Deux miroirs sont disposés à l'intérieur, de telle sorte que leurs plans fassent un angle droit entre eux et de 45° avec les faces AB et CD de la boîte. Sur le couvercle AB de la boîte est ménagée une ouverture EG recouverte d'un papier huilé ou d'un tissu fin. Une étroite bande noire sépare cette petite fenêtre en deux parties égales. Pendant le test, l'appareil est placé sur le banc photométrique entre les deux sources, disposition qui facilite le pointé : l'observateur peut juger de l'égalité des lumières qui sont réfléchies par les deux miroirs et viennent illuminer les deux plages translucides. Pour assurer la mesure, Ritchie préconise le même expédient que celui proposé par Christison et Turner : une fois découverte la position à partir de laquelle les deux lumières peuvent être distinguées, l'observateur effectue un déplacement alternatif de l'instrument, de part et d'autre de ce point. En diminuant petit à petit l'amplitude des oscillations, il parvient à positionner l'appareil au point d'égalisation. Le rapport des carrés des distances aux sources donne le rapport des intensités. Cette méthode d'affinement du pointé sera encore évoquée dans des publications plus tardives⁵⁰.

Sa simplicité n'empêche pas l'instrument de Ritchie d'être intéressant à plus d'un titre. Il est d'abord le prototype d'une série d'instruments désignés par Adrien Palaz sous le terme « photomètres à relief », dans son *Traité de photométrie industrielle*. Il s'agit sans doute d'indiquer par là qu'au lieu d'être reçus sur un même écran, les lumières des deux foyers illuminent deux plans symétriques formant un angle dièdre de façon à renvoyer les lumières vers une plage d'observation plus commode. Ainsi le photomètre de Ritchie se place entre les deux sources lumineuses, sur le même banc optique que celui portant

49. W. Ritchie, « On a new Photometer, founded on the Principles of Bouguer. », *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, Edinburgh, 1826, vol. 10, p. 443-445.

50. Voir, par exemple W. de Wiveleslie Abney, E. R. Festing, « The Bakerian Lecture, Colour Photometry », *Phil. Trans.*, 1886, vol. 177, p. 423-456.

les sources et donc dans le même axe que les faisceaux lumineux utiles. Les yeux rivés sur le dessus de la boîte, l'observateur peut comparer facilement l'intensité des plages illuminées, à condition qu'elles se présentent sous des couleurs voisines. Il est en effet impossible pour le système visuel humain de séparer l'attribut de brillance d'une lumière de celui de chrominance. Pour effectuer malgré tout la comparaison de flammes différemment colorées, Ritchie propose ce qu'il appelle un « stratagème »⁵¹ : il consiste à recueillir les faisceaux lumineux sur les deux plages translucides qui auront été préalablement imprimées. L'égalisation visuelle des deux lumières est obtenue lorsque la lecture peut s'effectuer de façon continue et avec la même facilité sur toute la surface imprimée. L'appareil permet donc la comparaison directe du pouvoir éclairant des deux sources. Les deux instruments de Ritchie offrent donc à la photométrie les possibilités de comparer deux sources : quantitativement d'abord, par leurs flux lumineux et qualitativement ensuite, par leurs pouvoirs éclairants. Il peut paraître étonnant que Ritchie et ses contemporains n'aient pas cherché à ébaucher une recherche de la relation existant entre ces deux mesures qui peuvent s'interpréter comme le signal d'entrée (le flux lumineux) et le signal de sortie (le pouvoir éclairant) du *système visuel humain*. Mais ces derniers étaient plus soucieux de la création d'un instrument pratique, propre à la mesure du pouvoir éclairant que d'une modélisation du système visuel humain exigeant une collecte importante de données qu'ils ne pouvaient pas encore concevoir. Ritchie est cependant le premier à formuler clairement la nature binaire de la photométrie et à distinguer ses deux composantes : la photométrie physique qui s'attache à la mesure du flux de lumière en terme de chaleur, c'est à dire d'énergie et la photométrie visuelle qui s'attache à la mesure du flux de lumière en terme de pouvoir éclairant, c'est à dire de sensation.

Si la valeur du pouvoir éclairant détermine l'autorisation de commercialisation du gaz d'éclairage, elle n'est pas forcément la plus pertinente pour déterminer le coût dont devra s'acquitter son acheteur. Sur le marché de la lumière, ou plutôt *des* lumières, le gaz, ou plutôt *les* gaz, offrent des solutions parmi d'autres. La filière de la lumière mobilise un grand nombre d'activités et des ressources en matières premières (charbon, huiles et graisses, résines) considérables. La rentabilité qu'en attendent les exploitants et les investisseurs se prévoit par des expertises avant tout comptables, mais le prix d'une lumière qui reste encore un produit de luxe dépend aussi des expertises physico-chimiques pour en déterminer la qualité. La photométrie va devoir ainsi se construire à la croisée des mondes économiques et industriels, technologiques et scientifiques. L'histoire de son évolution demande l'obser-

51. Ma traduction de *contrivance*.

vation des interactions entre ces différents espaces, des intersections entre les différents cercles d'entrepreneurs, d'ingénieurs, de savants académiciens où se créent les progrès du siècle. Constitués au sein de sociétés savantes, ces cercles ne sont pas seulement centrés sur Paris mais rayonnent aussi dans des villes de province : ainsi les membres très soudés de la Société industrielle de Mulhouse, fondée en 1826, participent-ils à la prospérité de la cité alsacienne.⁵²

3.2 Le prix de la lumière

La lumière du gaz doit faire la preuve de ses qualités. Armés d'une instrumentation photométrique encore rudimentaire, les ingénieurs de la nouvelle industrie devront relever ce premier défi. Car l'enjeu ne se limite plus, comme le souligne Clegg, à une question scientifique, il est devenu financier. Il faut valoriser un produit, le distribuer au public le plus large pour offrir aux investisseurs des bénéfices à la hauteur des capitaux engagés. Or la pertinence du nouveau mode d'éclairage est loin de recueillir en France l'unanimité du public qui se veut connaisseur et donne, comme ce lecteur des *Annales de chimie et de physique*, son avis :

» (...) Ainsi, véritablement, une lampe offre l'appareil le plus complet et le plus simple pour décomposer l'huile et produire de la flamme.

» Dans ce cas, une mèche de coton remplace admirablement bien les machines mille et mille fois plus chères et plus compliquées dont on se sert pour l'éclairage par le gaz inflammable de la houille, et ce serait évidemment faire un pas rétrograde que de vouloir employer de tels appareils dans l'éclairage par l'huile.

» J'imagine que le procédé que je critique ne présentera quelque avantage, même en Angleterre, qu'en le consacrant aux huiles de poisson, trop infectes pour être brûlées dans les appartemens...⁵³

Les résistances et les doutes sont nombreux, soutenus même par la plume de sommités scientifiques. C'est par exemple Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) qui ajoute sa voix à celle de Gay-Lussac pour exprimer son scepticisme face au progrès qu'apporterait la nouvelle lumière :

52. Lire sur ce sujet les travaux de Florence Ott, *La Société industrielle de Mulhouse (1826-1876) : ses hommes, son action, ses réseaux*, thèse, Paris, EHESS, 1999.

53. « LETTRE à MM. les Rédacteurs des Annales de Chimie et de Physique, sur l'éclairage par les gaz retirés de l'huile. », *Annales de chimie et de physique*, 1819, vol. 10, p. 233-234.

Si le gaz avait été connu en premier, on aurait regardé comme un homme de génie celui qui aurait inventé la bougie et aurait ainsi concentré dans le volume d'un dé tout le mécanisme d'une usine à gaz.⁵⁴

Peut-être ces réticences font-elles que les travaux des équipes écossaises ne soient suivis qu'avec un intérêt relatif. Ainsi le photomètre de Leslie ne suscite guère l'enthousiasme. Après sa réception par Guyton de Morveau, l'hygromètre-photomètre attendra cinquante ans, dans un couloir de l'Académie des sciences, avant que ne tombe le couperet catalan : dans une lettre adressée à son ami Alexandre de Humboldt et datée de mai 1850, Arago tranche :

Le photomètre de Leslie, à l'aide duquel il avait eu l'audace de vouloir comparer la lumière de la Lune à la lumière du Soleil par des actions calorifiques, est complètement défectueux. J'ai prouvé, en effet, que ce prétendu photomètre monte quand on l'expose à la lumière du Soleil, qu'il descend sous l'action de la lumière du feu ordinaire et qu'il reste complètement stationnaire lorsqu'il reçoit la lumière d'une lampe d'Argand.⁵⁵

Pour autant, les revues savantes, en France, rendent soigneusement compte des recherches menées en Grande-Bretagne, comme de celles de William Brande⁵⁶, initialement publiées dans les *Philosophical Transactions*⁵⁷ et publient la traduction complète des travaux de Christison et Turner⁵⁸. Les experts français réalisent aussi leurs propres études dont les conclusions soulèvent des controverses. Si le chimiste Nicolas Clément (1779-1841) met en

54. Cité dans *Centenaire de l'industrie du gaz en France*, Société technique de l'industrie du gaz, 1924, p. 57.

55. François Arago, *Sur le photomètre de Leslie*, en appendice de *Mémoires scientifiques*, deuxième édition, Paris, Librairie des sciences naturelles, Théodore Morgand, 1865, tome 1, p. 481-484.

56. W. Brande, « SUR les Facultés lumineuses et calorifiques du gaz oléfiant, du gaz extrait du charbon de terre, et du gaz que fournit la décomposition de l'huile. », *Annales de chimie et de physique*, 1821, tome 19, p. 196-207.

57. W. Brande, « The Bakerian Lecture. On the composition and analysis of the inflammable gaseous compounds resulting from the destructive distillation of coal and oil, with some remarks on their relative heating and illuminating powers. », *Phil. Trans.*, London, 1820, p. 11-28.

58. Robert Christison et Edward Turner, « De la Construction des Appareils (burners) destinés à brûler le gaz de l'huile et celui du charbon, et des circonstances qui influent sur la lumière émise par les gaz pendant leur combustion, avec quelques observations sur leur pouvoir éclairant relatif, et sur les différentes méthodes de l'estimer. », *Annales de chimie et de physique*, 1827, vol. 35, p. 309-325, p. 359-393.

doute la rentabilité en France de la jeune filière industrielle, Bérard répond dans une lettre adressée à Gay-Lussac et publiée dans les *Annales de chimie et de physique*. Son analyse « sur les Usines de gaz inflammable de la houille », qui est d'abord placée sur le registre économique, se focalise aussi sur la valeur du gaz d'éclairage et ses performances photométriques que Bérard compare avec celle de l'huile lampante, en se tournant vers la sacro-sainte et robuste méthode des ombres égales :

(...) on peut porter à 0f,04 le prix de la lumière qu'un quinquet donne dans une heure. Or, un bec de gaz, tels qu'ils ont été adoptés par les compagnies de Paris, donne, terme moyen, deux fois et demie plus de lumière qu'un quinquet qui n'userait qu'une once d'huile par heure. C'est une explication que j'ai déterminée moi-même plusieurs fois par l'intensité des ombres. J'ai cherché dans cette détermination à prendre pour modèle la manière de M. Fresnel, que j'ai eu l'avantage de voir opérer lorsqu'il est venu à l'usine faire quelques expériences sur ses phares. Il avait alors apporté le quinquet qui lui a toujours servi de terme de comparaison et une lampe Carcel de M. Wagner. Je les comparai l'une et l'autre au moment de leur plus grand éclat avec un bec de gaz alimenté par nos grands gazomètres, et je trouvai que lorsque la flamme du bec de gaz était élevée jusqu'à un centimètre de l'extrémité de la cheminée, comme on le fait dans les boutiques, et dans les théâtres, la lumière du bec de gaz était à celle du quinquet dans le rapport de 1,68 à 1, et à celle de la lampe Carcel dans le rapport de 1,40 à 1. Je m'assurai que le quinquet brûlait 42 grammes d'huile par heure ; je ne me trouvai pas dans le moment de balances assez fortes pour peser la lampe de Carcel, et déterminer la consommation, quant au gaz qui alimentait le bec qui servait de comparaison ; 4 pieds cubes étaient nécessaires pour la consommation d'une heure, et, d'après l'analyse que j'en fis alors, il exigeait, pour sa combustion complète, 120 p. d'oxygène pour 100. D'après cette donnée sur l'exactitude de laquelle je ne conserve aucun doute, si la valeur de la lumière d'un bec d'Argand usant 30 gr. d'huile à l'heure est de 0f,04c, celle d'un bec de gaz ordinaire doit valoir, terme moyen, près de 0,10c. L'éclairage au gaz a d'ailleurs assez d'avantages par lui-même pour qu'on ne soit pas obligé d'en baisser le prix réel pour le faire entrer en concurrence avec les autres éclairages.⁵⁹

59. J. E. Bérard, « LETTRE de M. Bérard à M. Gay-Lussac sur les Usines de gaz inflammable de la houille. », *Annales de chimie et de physique*, 1825, tome 28 , p. 113-128.

La contre-expertise que Bérard livre sur les données avancées par Clément apparaît être celle d'un gestionnaire. Bérard examine à la loupe, d'un côté, le coût des investissements : maçonnerie, charpente, appareils dont les cornues de fonte et leur remplacement, enfin le coût de la matière première, le charbon ; de l'autre les recettes rapportées par la vente des produits : le prix du gaz au bec, le coke, les goudrons et le « casuel ». Finalement, en termes de bénéfices, l'usine parisienne surclasse (de peu) celle de Glasgow. Lorsque enfin Bérard aborde la question de la mesure du pouvoir éclairant, il se contente d'évoquer la « méthode des ombres » ou « les moyens ordinaires ». Il est frappant que son exposé n'utilise à aucun moment les termes photomètre et photométrie qui sont pourtant employés sans complexe par ses confrères d'outre Manche (voir supra l'étude de Christison et Turner). Seules sont citées les références à Fresnel et à l'horloger Wagner comme s'il s'agissait d'apporter crédit à l'étude et signifier que les comparaisons des lumières se sont faites selon les règles de l'art. Tout semble indiquer qu'aux yeux des experts continentaux les règles du « Nouvel art » annoncé par Pierre Bouguer restent encore trop lacunaires, pour prétendre au rang de science et supprimer les biais qu'introduisent les incertitudes de la vue. C'est aussi qu'il n'y a pas d'*unité* de lumière, pas plus que d'échelle d'intensité lumineuse. La comparaison par les ombres s'apparente à une simple technique de vérification par la comparaison à un modèle ou à une pièce prototype, contrôle de dimension, d'apparence, de texture, de couleur, de transparence, et cetera, comme il y en a tant dans tous les corps de métiers et dont la fiabilité repose sur la seule expérience de l'ouvrier et de l'artisan.

Pendant tout le premier XIX^e siècle, la littérature technique ignore, en France, le mot « photométrie », quand le gaz d'éclairage continue pourtant à se répandre dans tout le royaume. Il est vrai que sous les monarchies censitaires, l'étude de la nouvelle lumière est plutôt abordée sous l'angle de la chimie. Selon les règles de cette science bien établie, enrichie par ses méthodes d'analyse et de synthèse éprouvées, la valeur d'un combustible végétal, tant vert que fossile, peut se déterminer par l'analyse des distillats que fournit sa décomposition par la chaleur. Dans son *Traité de chimie appliquée aux arts*, publié en 1828, Dumas expose de façon détaillée l'économie de ces ressources et décrit les filières qui de la houille et des matières grasses conduisent au gaz d'éclairage. L'article 680 consacré au pouvoir éclairant évoque certes la méthode des ombres mais pour mieux souligner les écarts considérables d'une évaluation à une autre :

Cette valeur se détermine par le procédé connu de la comparaison des ombres. Nous allons comparer le gaz de la houille et de l'huile entre eux, puis avec les autres lumières artificielles.

Le gaz de l'huile éclaire mieux que celui de la houille, cela est incontestable mais leurs variations respectives sont si grandes, que les auteurs qui se sont occupés de les comparer ont trouvé des rapports tout-à-fait différens. Le pouvoir éclairant du gaz de la houille étant pris pour unité, celui de l'huile pourrait être égal à 2, $2\frac{1}{2}$, 3, $3\frac{1}{2}$ et même 4. Ces différences énormes peuvent aussi tenir, en partie du moins, au mode de combustion du gaz, comme on le verra plus loin.⁶⁰

Il est clair que l'obtention de résultats reproductibles suppose une définition précise des protocoles expérimentaux, en particulier de la pression du gaz⁶¹, du type de bec employé, du diamètre des trous, de la hauteur de la flamme. À l'époque où il publie son traité, faute, en France, d'une étude systématique offrant des résultats reproductibles, Dumas doit utiliser les résultats obtenus par Christison et Turner dans leur étude comparative du gaz de houille et du gaz d'huile, publiée trois ans plus tôt (voir infra). De telles études sont pourtant importantes du point de vue économique : il faut non seulement mettre en perspective les lumières obtenues avec les paramètres précédents, mais aussi avec la dépense en combustible. La comparaison ne concerne pas seulement le gaz d'huile et le gaz de houille, il faut justifier les investissements consentis dans la fabrication et la distribution du gaz et déterminer si les gaz d'huile et de houille sont préférables à l'huile des lampes. Incontestablement oui, répond Dumas, car si les coûts pour alimenter 200 becs à l'année sont équivalents — 10600 francs pour le gaz contre 10680 francs pour l'huile lampante —, le pouvoir éclairant offert par les becs à gaz est bien supérieur à celui des becs à huile. Et Dumas, reprenant les chiffres de Bérard, d'affirmer qu'en prenant pour unité la lumière des lampes, celle du gaz sera 2 à $2\frac{1}{2}$, « ce qui revient à dire qu'on aura par le gaz pour 20 ou 25, 000 fr. de lumière. »⁶² On le voit ici : ce n'est pas tant les intensités de deux lumières que la méthode « des ombres » — sous-entendu photométrique — permet de comparer, c'est bien plutôt le prix à payer pour chacune de ces lumières.

Les progrès de la technologie gazière accompagnent un entrepreneuriat bien décidé à faire de la jeune activité une industrie florissante. La recherche du combustible qui offrira le gaz le plus riche en hydrocarbures et partant, la flamme la plus éclairante, devient un enjeu qui mobilise autant des

60. J. B. Dumas, *Traité de chimie appliquée aux arts*, Paris, Béchét, 1828, tome 1, p. 667.

61. La littérature de l'époque avance des valeurs de 1 à 2 cm, sous-entendu de hauteurs d'eau, ce qui correspond à des pressions de 1 à 2 mBar, à comparer aux valeurs actuelles des pressions des gaz commerciaux en France de l'ordre de 20 à 30 mBar.

62. J. B. Dumas, [Dum28], p. 684.

entrepreneurs-ingénieurs que des universitaires de renom. Souhaitant valoriser leur production, les exploitants des gisements demandent le secours de la science et l'expertise du monde académique. L'alliance entre science et industrie se noue au sein de sociétés savantes, regroupant chercheurs et capitaines d'industrie, alliance encouragée autant sous le Premier Empire que sous la Restauration, la monarchie de Juillet et enfin le Second Empire, dans un contexte de rivalité économique avec l'Angleterre. Et il n'est pas un de ces régimes qui ne décrète ou n'ordonne la création d'une école pour former les ouvriers qualifiés et les ingénieurs que réclame une industrie qui monte en puissance. La diffusion des nouveaux savoirs techniques passe par les bulletins de ces organisations indépendantes, déclarées d'utilité publique : dès 1824 pour la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale, en 1832 pour la Société industrielle de Mulhouse.

Dans leur traité consacré à l'éclairage au gaz, Pelouze père (il s'agit d'Edmond, ?-1850) et fils (Théophile-Jules, 1807-1867) peuvent rendre compte des résultats de laboratoire attendus par les acteurs de la filière et ainsi font-ils pour l'analyse menée en 1831 par l'École des mineurs de Saint-Étienne sur différentes variétés de houilles⁶³. Mais c'est pour mieux en dénoncer les biais. Pelouze critique notamment des protocoles de laboratoire inadaptés pour évaluer les rendements des combustibles, opérations qui doivent se mener en « grand » ou pour le moins en « demi-grand » :

Ces résultats très nombreux que nous rapportons de vastes opérations, dans lesquelles rien n'a été négligé pour assurer les meilleurs produits et pour les évaluer avec certitude, nous semblent suffisants pour apprécier les rendements de la houille, et beaucoup plus concluants que tous les essais de laboratoire, qui, en général, offrent toujours des produits beaucoup plus abondants que les opérations en fabrique.⁶⁴

Pelouze reproche aux auteurs d'énoncer des résultats pour 100 « kilos » de houille quand il les soupçonne d'avoir distillé des quantités bien plus faibles de combustible sans doute à l'état divisé, puis d'avoir extrapolé les résultats. Dans ces conditions, l'homogénéisation de la température, si difficile à obtenir dans les cornues, en fabrique, est grandement facilitée. Néanmoins, l'évaluation des charbons sortis des puits du bassin de Saint-Étienne et leur comparaison au « flénu de Mons » importé de Belgique réservent trois co-

63. Pelouze père, Pelouze fils, *Traité de l'éclairage au gaz tiré de la houille, des bitumes, du lignite, de la tourbe, des huiles, des résines, des graisses, etc.*, Paris, Magnin, Blanchard, E. Lacroix, 1839., p. xx et xxi.

64. Pelouze, *ibid.*, p. xx.

lonnes aux valeurs photométriques précisant la « Dépense du bec à l'heure », l'« Intensité absolue de lumière » et l'« Intensité de la lumière, la dépense d'un bec étant constante ». Les résultats sont bien différents des grossières évaluations fournies par Bérard et Dumas et affichent cette fois deux décimales, ce qui est cohérent avec la précision ($\approx 1,5\%$) de la méthode des ombres.

Tableau des expériences faites au laboratoire de l'École des Mineurs de Saint-Etienne, en 1831 *.

DÉSIGNATION de la HOUILLE par exploitation.	Durée du dégagement du gaz.	Quantité de gaz par 100 kilos de houille.	Dépense d'un bec à l'heure.	Intensité absolue de la lumière.	Intensité de la lumière, la dépense d'un bec étant constante.	Quantité de coke produite par 100 kil. de houille.	Quantité de cendres par 100 kilos de houille.
1. Houille de Mons (flénu)	3	34,000	206	9.45	9.45	68.21	4.10
2. Houille de Firminy. { Mines de La- { tour et la { Malfolie par { parties égales	2 3/4	34,765	214	10.12	9.63	69.47	7.61
3. Houille de La Bé- { raudière..... { Parties égales { des mines de { Larderet, { Chomier, { Lacombe..	2 1/4	33,037	229	13.23	11.91	66.55	4.34
4. Houille du Bois Mouzil.....	2 1/4	35,972	223	10.55	9.73	73.16	4.44
5. Houille du Treuil.....	2 1/2	34,272	230	11.13	9.89	70.11	4.22
6. Houille du Soleil (Bréchnignac)..	2 1/2	36,550	188	9.65	10.52	69.70	8.71
7. Houille de Rive-de-Gier (mine de { la Grand'-Croix).....	2 1/4	34,544	206	9.20	9.20	72.33	4.62
8. Houille de Rive-de-Gier (mine des { Verchères).....	3	34,000	240	10.13	8.68	72.83	6.26
NOTA. La houille de Mons (flénu) a été le terme de comparaison.							

fig. 3.4 – Résultats du laboratoire de l'École des mineurs de Saint-Étienne, 1831 , tirés de Pelouze, *Traité de l'éclairage au gaz*, Paris, 1839, p. xxi.

Malheureusement, le tableau ne précise pas la nature de la lumière de

référence : lampe Carcel ou bougie tirée de « six à la livre » et l'on peut s'interroger sur l'étiquette « Intensité absolue de lumière »⁶⁵.

Un autre cas exemplaire des habitudes de la *première* photométrie industrielle est l'expertise commanditée en 1834 sur le gaz de résine, par la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale⁶⁶. Pauvre en charbon, la France doit se tourner vers ses gisements de chlorobiontes. Dans le département des Landes, on sait tirer des pins une résine dont le chauffage fournit une huile qui semble prometteuse. La commission chargée de l'examen des installations de messieurs Boscary et Danré a pour membres Claude Pouillet, Anselme Payen (1795-1871), Eugène Pécelet (1793-1857), Henri-François Gaultier de Claubry (1792-1878), Joseph d'Arcet. Ces personnalités appartiennent à la même génération de scientifiques (excepté d'Arcet, le plus âgé) et sont toutes reconnues pour leurs travaux. Parmi elles, figurent des entrepreneurs comme Payen et d'Arcet, propriétaires d'importantes manufactures de produits chimiques⁶⁷.

L'expertise dirigée par Pouillet est exemplaire car elle laisse de côté la question du rendement en gaz des procédés utilisés dans les établissements Boscary et Danré, pour ne s'intéresser qu'à la mesure du pouvoir éclairant de deux combustibles (le gaz de houille et le gaz de résine), dans des becs de formes différentes : becs ronds, becs plats... Dans son rapport, Pouillet décrit très précisément la méthode photométrique employée :

Dans toutes ces expériences, nous avons pris pour unité ou terme de comparaison l'intensité de la flamme d'une lampe de Carcel, nous avons employé deux lampes pareilles qui étaient vérifiées l'une par l'autre, afin d'avoir une garantie suffisante contre toute espèce de variation accidentelle dans l'unité de mesure.

La lampe et le bec soumis à l'expérience éclairaient une feuille de papier blanc tendue sur un cadre, tandis qu'une tige cylindrique y projetait ses ombres. Ce moyen de comparer les intensités de deux lumières offre, comme on sait, une assez grande précision lorsqu'il est employé avec les précautions convenables. Le bec étant fixe, la lampe était éloignée ou rapprochée jusqu'au point où les ombres

65. Une hypothèse plausible est qu'il s'agirait simplement de la mesure brute de l'intensité, sans correction du débit du gaz pour rendre la consommation constante.

66. C. Pouillet, « RAPPORT fait par M. Pouillet, au nom d'une Commission spéciale, sur les résultats obtenus par MM. Boscary et Danré dans la fabrication du gaz de résine. », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale*, 1834, n°35, p. 71-75.

67. Leurs usines sont aussi dénoncées comme parmi les plus polluantes de la capitale, ce qui n'empêche pas la présence de Payen et d'Arcet au Conseil d'hygiène publique et de salubrité de Paris.

paraissaient parfaitement égales, et nous nous sommes assurés, en répétant plusieurs fois la même épreuve, que des observateurs différents tombaient toujours à très peu près au même point. La dépense en gaz, correspondante à chaque intensité observée, était mesurée ensuite en laissant brûler le bec pendant plusieurs heures avec la même flamme.⁶⁸

Les « précautions convenables » qu'évoque Pouillet sont certainement les mêmes que celles préconisées par Pécelet, à la suite de ses observations, dans son *Traité de l'éclairage* : utiliser un écran mat, approcher la tige « ombrante » le plus possible de l'écran, rapprocher les deux ombres l'une de l'autre jusqu'à les faire se toucher, etc. Si la lumière de référence est celle d'une « lampe à mouvement »⁶⁹, il faut laisser brûler la lampe quatre à cinq heures avant d'obtenir une intensité lumineuse constante⁷⁰. Les résultats des expériences effectuées par Pouillet et consorts (page suivante, figure 3.5) sont aussi éclairants à plus d'un titre : on apprend que la lumière de référence est celle émise par la flamme d'une lampe Carcel, du même modèle que celle utilisée par Fresnel et Arago dans leurs expertises sur les phares. Actionnée par un mécanisme d'horlogerie, la pompe de l'instrument alimente la mèche par une huile surabondante, fournissant par là une lumière d'intensité presque constante. Fait inhabituel : Pouillet fournit au lecteur les valeurs des distances à l'écran d'observation, mesurées pour la lampe de Carcel (colonne 2) et pour le bec en essai (colonne 3). Souvent omises, ces valeurs permettent pourtant la reproduction des expériences et la vérification des intensités obtenues. Quant à la dépense en gaz, elle est exprimée en pieds cubes. L'étude montre sans équivoque la supériorité du gaz de résine, tant du point de vue du pouvoir éclairant que de la dépense et elle met aussi en évidence la supériorité des gros becs, les petits becs consommant, à pression égale, deux fois plus de gaz pour une même efficacité lumineuse. Pouillet insiste également sur la répétition des épreuves par des observateurs différents, méthode qui n'est pas sans évoquer les études *R & R* de répétabilité et de reproductibilité qui permettent d'évaluer la variabilité d'un système de mesure et qui se pratiquent fréquemment dans le champ de l'instrumentation industrielle⁷¹. Même si Pouillet ne fournit pas dans son rapport les « intervalles de vraisemblance » qui accompagnent aujourd'hui les mesures en secteur de production,

68. C. Pouillet, *ibid.*, p. 73.

69. C'est à dire munie d'une pompe mécanique selon le modèle de la lampe Carcel.

70. E. Pécelet, *Traité de l'éclairage*, Paris, De Malher et Cie, 1827, p. 213-225.

71. À noter que l'étude de reproductibilité suppose la réalisation des épreuves par des observateurs différents mais avec le même instrument de mesure. Cette réalisation est impossible pour la méthode des ombres qui utilise l'œil de l'expérimentateur.

TABLEAU des expériences faites pour déterminer le pouvoir éclairant du gaz de résine et du gaz de houille.

NUMÉROS des BECs.	DISTANCES		INTENSITÉ, la lampe de Carcel étant prise pour l'unité.	DÉPENSE en une heure.	DÉPENSE pour une intensité égale à la Carcel.	INDICATION des séries.
	de la lampe.	du bec.				
BECs ROUNDS NOUVEAUX ET BEC ORDINAIRE.						
<i>Gaz de résine.</i>						
1	2 ^m , 40	3 ^m , 05	1, 615	2, 590	1, 604	} 1 ^{re} série.
2	3 17	3 89	1 506	2 318	1 541	
3	3 40	3 87	1 296	1 900	1 470	
4	3 67	3 85	1 100	1 660	1 510	
5	3 52	3 14	0 795	1 227	1 540	
Bec ordinaire de la Ville.	3 08	3 13	1 033	2 181	2 111	
MÊMES BECS.						
<i>Gaz de houille.</i>						
1	2 63	3 05	1 408	3 476	2 47	} 2 ^e série.
2	2 69	3 05	1 286	3 54	2 59	
3	2 79	3 04	1 187	2 59	2 18	
Bec ordinaire de la Ville.	3 34	3 18	0 906	3 272	3 61	
BECs PLATS NOUVEAUX.						
<i>Gaz de résine.</i>						
1	2 24	3 33	2 21	2 830	1 281	} 3 ^e série.
2	2 28	3 20	1 97	2 680	1 360	
3	2 73	3 33	1 49	2 1	1 344	
4	2 51	2 66	0 89	1 636	1 707	
5	3 07	2 51	0 67	1 285	1 922	
6	3 41	1 96	0 33	0 967	2 936	
BECs PLATS DE LA VILLE.						
<i>Gaz de houille.</i>						
Grand bec, ou- verture adminis- trative. Flamme 5 p ^o , 2 p ^o 4 lig.	2 47	3 38	1 873	4 250	2 275	} 4 ^e série.
Demi-bec, ou- verture adminis- trative. Flamme 2 p ^o , 1 p ^o 10 l.	3 74	3 38	0 8200	2 840	3 460	
LANTERNE DE LA VILLE.						
L'intensité de la lanterne est 0,107 ou 176 ^e .						

fig. 3.5 – Comparaison des pouvoirs éclairants du gaz de résine et du gaz de houille, réalisée par la commission Pouillet, 1831, *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, Paris, 1834, n°35, p. 72.

par la modernité de la méthodologie mise en place dans l'expertise du gaz de houille et du gaz de résine, il fait entrer la photométrie dans le domaine du contrôle industriel. Mais si le futur académicien s'attache scrupuleusement à la reproductibilité des mesures, il reste que la « précision » de ces dernières reste limitée par le facteur $\frac{1}{64}$ établi par Bouguer.

Une analyse rapide pourrait laisser penser qu'à la faveur du déploiement de l'industrie gazière, l'instrumentation photométrique soit créditée de progrès notables. Les données publiées dans le *journal de l'industriel et du capitaliste*⁷² fournissent une vision précise de ce déploiement pour la ville de Paris : L'éclairage public de la capitale est principalement assuré par les équi-

ECLAIRAGE. — A Paris. — L'éclairage des rues de Paris a coûté l'année dernière 805,107 fr. 18 c. ; il se composait de trois systèmes : éclairage à l'huile avec mèches plates, éclairage à l'huile avec mèches cylindriques, éclairage par le gaz. Le premier a donné de la lumière par 12,892 becs, pendant 38,660,442 heures 11 minutes, à raison de 1 c. 647 par heure; le second, qui est en essai, a brûlé de l'huile pendant 40,299 heures 50 minutes, à raison de 7 c. l'heure; le troisième a consommé du gaz pendant 1,047,495 heures, au prix moyen de 4 c. et demi environ par heure. On a calculé que chaque bec d'huile consommait environ 8 grammes 41 centig. d'huile.

fig. 3.6 – État de l'éclairage public à Paris, 1837, données tirées du *Journal de l'industriel et du capitaliste*, tome 3, Paris, 1837, p. 573.

pements traditionnels à flamme d'huile : réverbères voire simples lanternes, à mèches plates. Quant aux becs à mèches cylindriques, type becs d'Argand, ils sont « en essai » et ont assuré, en temps cumulé, mille fois moins d'heures d'éclairage que les simples becs à mèches plates ! Nous sommes donc loin d'un déploiement massif de l'éclairage au gaz sur l'espace public. Dans « Une histoire matérielle de la lumière » Jean-Baptiste Fressoz s'est intéressé à ce passage de l'âge de l'énergie *organique* issue des graisses d'origines végétale et animale à l'âge de l'énergie *carbonée*, tirée des combustibles fossiles. Mais la mise au point de la bougie stéarique qui a mobilisé des chimistes fameux

72. Fondé par les ingénieurs civils Auguste Perdonnet (1801-1867), Eugène Flachet (1802-1873), Jules François Burat (1807-1885) et Amédée Burat (1809-1883).

(Henri Braconnot (1780-1855), Michel-Eugène Chevreul (1786-1889), Gay-Lussac) et un industriel avisé, Louis-Adolphe de Milly (1799-1876), le créateur de la « bougie de l'étoile », donne encore l'avantage aux corps gras sur le gaz mais, ainsi que remarqué par Fressoz : « Le gaz d'éclairage ne se substitue pas à la bougie et à la lampe à huile, il s'y ajoute de manière modeste en se concentrant sur certains usages (Paris, les bourgeois, le commerce). »⁷³ Le gaz reste donc un moyen d'éclairage confidentiel durant toute la première partie du siècle. La modernisation très lente du service public de l'éclairage ne peut guère favoriser la recherche active de nouvelles voies, pour une instrumentation photométrique restant confrontée aux mêmes problématiques séculaires.

Dans les années suivantes, aucune invention signalée ne viendra créditer la photométrie, tant dans la recherche d'un étalon pratique de lumière que dans l'essai de comparaison des lumières en épreuve. Le 26 mai 1852, Paul Marie Joseph Jeanneney (1812-1862) présente à la Société industrielle de Mulhouse sa « Notice sur l'éclairage au gaz ». Sorti diplômé de l'École centrale en 1833, Paul Jeanneney a commencé sa carrière sous la houlette d'Eugène Flachat (1802-1873). Ce dernier a participé à la construction du chemin de fer de Paris à Saint-Germain et a formé un important réseau d'ingénieurs dits « civils », par opposition aux ingénieurs de l'État, issus principalement de l'École polytechnique⁷⁴. De 1843 à 1847, Jeanneney se consacre notamment à la construction d'installations pour l'éclairage au gaz des fabriques, le gaz étant obtenu par distillation de graisses et de résines. Dans son rapport, Jeanneney donne le prix de revient de la lumière fournie par un bec, équivalente à celle de 7 bougies, sans plus de considération technique⁷⁵.

Le gaz provenant de cette fabrication revient moyennement à fr. 1,20 les mille litres. Un bec dépensant 35 litres, donne la lumière de 7 bougies ; ce qui porte le bec à 4 2/10 centimes par heure.⁷⁶

L'innovation que présente l'ingénieur est l'utilisation du suint, cette matière grasse qui imprègne la laine des moutons, à la fabrication du gaz d'éclairage. Mélangées à de la chaux, les eaux qui ont servi au lavage de la laine

73. Jean-Baptiste Fressoz, « Une histoire matérielle de la lumière » in François Jarrige, Alexis Vrignon (dir.), *Face à la puissance, une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris, La Découverte, 2020.

74. Voir le résumé de la carrière de Paul Jeanneney dans les Mémoires et comptes rendus des travaux de la Société des ingénieurs civils, 1863, n°21, p. 26.

75. Ce coût peut être rapproché du salaire journalier d'un ouvrier, environ 3 francs pour une journée de 11 heures de travail.

76. Paul Jeanneney, « Notice sur l'éclairage au gaz », *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1853, tome 25, n° 121, p. 5-30.

sont filtrées pour fournir une matière solide, plus ou moins riche en graisses, le « suinter ». La distillation de cette pâte fournit un gaz dont le prix de revient se monte à 3 8/10 centimes par heure, pour un pouvoir éclairant toujours de 7 bougies. L'économie par rapport au gaz de résine est donc faible, mais l'idée de Jeanneney procède moins d'une visée spéculative que de la recherche d'une nouvelle source de corps gras, voire d'une filière assurant le recyclage des sous-produits d'une industrie de la laine qui se révèle polluante. L'expertise de ce spécialiste des machines à vapeur se porte également sur d'autres combustibles, en particulier une houille importée d'Écosse, le « *Boghead-Cannel-Coal* » et surtout sur le procédé de son chauffage dans les cornues dont le rendement peut s'améliorer en limitant l'épaisseur de la couche de houille.

Les procédés proposés par Jeanneney vont faire l'objet de l'examen minutieux des comités désignés par la Société industrielle de Mulhouse. Achille Penot (1801-1885), un professeur du collège de Mulhouse, docteur ès sciences, Gustave Dollfus (1829-1905), un ingénieur centralien, Émile Burnat (1828-1920), également diplômé de l'École centrale, Auguste Dollfus (1832-1911) qui deviendra industriel du textile, tous ces membres issus de la société industrielle et solidaire de Mulhouse participeront à ces travaux⁷⁷. Penot résume ainsi les travaux de la commission :

(...) elle a comparé au double point de vue de leur puissance et de leur économie, les différents moyens de se procurer la lumière artificielle ; (...) Pour juger rigoureusement la valeur comparative des diverses matières employées à produire le gaz, il faut s'occuper d'abord des procédés de fabrication ; en estimer les frais ; chercher quel est le rendement d'un kilogr. de chaque substance, et le prix du mètre cube du gaz obtenu ; puis déterminer par l'expérience le pouvoir éclairant de chaque variété de gaz. C'est ensuite en combinant toutes ces données, et en les rapportant à une même unité, qu'on arrive à déterminer la valeur relative de chacun d'eux ; et en suivant une marche analogue avec tous les autres moyens d'obtenir la lumière, on peut comparer d'une manière juste et sûre, les différents modes d'éclairage les plus usités.⁷⁸

Le rapport de Penot décrit dans tous les détails la méthode photométrique

77. Sur l'histoire des entrepreneurs mulhousiens au XIX^e siècle, voir Michel Hau, « Institutions patronales et coopération à Mulhouse au XIX^e siècle », in Jean-François Eck, Michel Lescure (dir.), *Villes et districts industriels en Europe occidentale (XVII^e-XX^e siècle)*, Presses universitaires François-Rabelais, 2002, p. 149-159 et Florence Ott, [Ott99].

78. A. Penot, « Sur le mémoire de M. Jeanneney, relatif à l'éclairage au gaz, présenté par M. le docteur Penot, au nom d'une commission désignée par les comités de chimie et

employée qui reste la recherche de l'égalité des ombres. L'étalon pratique de lumière est ici une bougie stéarique « brûlant constamment 9 gr. 60 de matière par heure » ou « de cinq à la livre » selon son appellation commerciale. Les résultats affichés sont « des moyennes de cinq à dix expériences »⁷⁹. On trouve également les définitions de deux des grandeurs fondamentales de cette jeune physique appliquée à l'éclairage, définitions ici provisoires dans la mesure où la lumière de référence n'est encore ici qu'un choix de circonstance. Selon la commission de Mulhouse, la « puissance » ou « pouvoir éclairant » d'une lumière est « le nombre de bougies normales qu'elle peut remplacer »⁸⁰. Cette grandeur ne préjuge pas la quantité de combustible brûlé, aussi faut-il ajouter la notion de « titre » que Penot définit pour le gaz d'éclairage :

le nombre de bougies nécessaires pour équivaloir à la lumière fournie par un nombre de becs suffisant pour brûler en une heure 100 litres de ce gaz. Ainsi, lorsque nous disons que le titre d'un gaz est de 10 bougies, cela signifie que la lumière fournie par un ou plusieurs becs brûlant 100 litres de ce gaz en une heure, représente celle de 10 bougies.⁸¹

Un calcul élémentaire fournit le titre à partir de la puissance et de la consommation horaire du bec⁸². Pour les combustibles liquides et solides, le rapport de Penot définit le titre comme « le nombre de bougies nécessaires pour équivaloir à la lumière fournie par la combustion de 9 gr. 60 de chacune de ces matières. »⁸³

Ces définitions posées, le comité mulhousien se consacre à la caractérisation des sources de lumière les plus usitées. Son œuvre importante offre un panorama complet des divers moyens d'éclairage utilisés à l'échelle industrielle dans les manufactures alsaciennes, dans cette époque de transition précédant l'âge du « pétrole lampant » où se côtoient bougies stéariques, chandelles de suif, becs de quinquet et autres lampes à huile, becs de gaz

de mécanique, dans la séance du 27 Avril 1853. », *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1853, tome 25, n°121, p. 30-96.

79. A. Penot, *ibid.*, p. 40.

80. A. Penot, *ibid.*, p. 40.

81. A. Penot, *ibid.*, p. 41.

82. Soit un bec consommant 35 litres de gaz par heure pour une puissance de 6,47 bougies, le titre x s'obtient par $35 : 100 :: 6,47 : x$. (x est à 6,47, ce que 100 est à 35). D'où

$$x = \frac{100 \times 6,47}{35} = 18,486$$

où x s'exprime en *bougies*, A. Penot, *ibid.*, p. 41.

83. A. Penot, *ibid.*, p. 42.

de bois, d'huile, de suinter, de houille, etc. L'étude décrit dans le détail les moyens employés et fournit les données photométriques : pouvoir éclairant et titre exprimés en bougie dite « normale » et le coût d'une heure d'éclairage pour le consommateur. Les premiers essais relatés concernent les « chandelles ordinaires », dites « de cinq à la livre ».

La bougie normale ayant été maintenue à une distance constante de 0 m. 881 du plan éclairé, la moyenne de vingt-cinq essais a donné pour la distance de la chandelle au même plan, 0 m. 768 pour obtenir des ombres égales : la chandelle ayant été d'ailleurs toujours maintenue à son maximum de clarté, par un entretien convenable de la mèche⁸⁴.

De ces deux données, on tire le pouvoir éclairant de la chandelle par rapport à la bougie normale, soit

$$\left(\frac{768}{881}\right)^2 = 0,759$$

Le rapport de Penot en dit long sur l'effort de rigueur déployé pour obtenir des valeurs de référence sur les lampadaires les plus usités. Le banc de mesure affiche les distances au millimètre près, si l'on en croit la distance affichée de la lumière unité à l'écran. Le ou les opérateurs effectue vingt-cinq épreuves pour la mesure de la distance du luminaire en essai à l'écran. La chandelle n'ayant brûlé dans l'heure que 7,514 g (la masse est mesurée au milligramme près), le titre de la chandelle du commerce est ramenée à

$$x = \frac{0,759 \times 9,60}{7,514} = 0,969$$

un titre presque égal à celui de la bougie normale. Penot, toujours, indique :

Les mêmes expériences ayant été reprises avec une chandelle provenant d'une autre fabrication, on a trouvé :

Pouvoir éclairant 0^b, 822

Titre 1^b, 035

Enfin une troisième chandelle, différant des deux autres, a donné :

Pouvoir éclairant 1^b, 170

Titre 0^b, 965

On voit donc combien les chandelles qu'on trouve dans le commerce peuvent différer entre elles.⁸⁵

84. A. Penot, *ibid.*, p. 42.

85. A. Penot, *ibid.*, p. 43.

Par la précision de ses instruments, le comité de Mulhouse se montre capable de mettre en évidence des différences significatives entre des luminaires supposés de qualités identiques. Ses expertises rejoignent, par les moyens mis en œuvre, la précision des mesures effectuées, celles que réaliseront plus tard les grands laboratoires institutionnels de contrôle comme le Laboratoire d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines créé en 1901, à l'initiative de l'État, au sein du Conservatoire national des arts et métiers⁸⁶.

3.3 Expertises et normalisation

Cette démarche de « contrôle de qualité » semble animer tous les acteurs d'une industrie que les régimes politiques en place, la monarchie de Juillet puis le Second Empire veulent mettre en position de rivaliser avec celle des puissances concurrentes, lors des grandes compétitions que sont les expositions internationales. Si l'éclairage public intéresse le pouvoir, la mesure de la qualité du gaz reste encore secondaire. Ce sont sur les conditions de sa production, de sa distribution que se porte l'attention des autorités. La question du gaz d'éclairage est abordée comme un point de police administrative : il s'agit de vérifier la réglementation qu'imposent l'insalubrité de l'activité, sa dangerosité, en particulier les risques d'incendie constitués par les cornues de distillation, chauffées à blanc ou les vapeurs autant inflammables que toxiques des goudrons, l'utilisation de la voirie publique, le partage du « Pavé de Paris »[indexPavé de Paris@Pavé de Paris](#). Le département de la Seine devient, en la matière, le territoire *pilote* et en octobre 1841, la Commission d'éclairage par le gaz remet au Préfet de police son rapport sur « les diverses questions qui se rattachent à ce mode d'éclairage ». Ce sont donc la prévention des risques et les préoccupations sanitaires qui animent en premier les experts soigneusement choisis entre la Préfecture de la Seine et la Préfecture de police.

Cette Commission était composée dans le principe, ainsi qu'il suit : MM. Arago, membre de l'Institut. BARRUEL, membre du Conseil de Salubrité ; EMMERY, ingénieur en chef, directeur du Service municipal ; Mary, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées ; Nicollas, chef du bureau de l'Éclairage, à la Préfecture de Police ; Partiot, ingénieur en chef, directeur du Pavé de Paris ; Lemaire, chef de la division des Travaux publics, à la Préfecture

86. Cette création est entérinée le 13 juin 1901 par une convention entre le ministre du commerce, de l'industrie, des postes et des télégraphes, le Conservatoire national des arts et métiers et la chambre de commerce de Paris. Le laboratoire du Cnam ayant activement collaboré aux travaux de la Convention du mètre (fondée en 1875), semblait le lieu le mieux adapté pour accueillir cette nouvelle institution de la métrologie française.

de la Seine ; RIEUBLANC, chef de la Division administrative, à la Préfecture de Police ; Ronault, architecte, commissaire de la Petite Voirie ; TRÉMERY, ingénieur en chef des Mines du département ; TREMISOT, chef de bureau, à la Préfecture de la Seine ; TREBUCHET, chef du bureau des Établissements insalubres, à la Préfecture de Police, *rapporteur*. M.LEMAIRE, nommé trésorier municipal de la ville de Paris, a été remplacé par M.Planson. MM. BARRUEL, décédé, et Partiot, nommé ingénieur en chef à Toulouse, ont été remplacés par MM. D'ARCET, membre de l'Institut et du Conseil de Salubrité, et BOUTRON, membre du Conseil de Salubrité.⁸⁷

Aux côtés des ingénieurs spécialistes en travaux publics, siègent en force les experts en matière de salubrité, dont Joseph d'Arcet, Antoine François Boutron Charlard (1796- 1879) et Adolphe Trébuchet (1801-1865), tous membres du Conseil d'hygiène publique et de salubrité.⁸⁸ Il n'en demeure pas moins qu'il faut définir, comme pour toute marchandise, les conditions de la livraison à la clientèle, en particulier en termes de consommation pour une puissance éclairante donnée. C'est le rôle d'une nouvelle commission constituée en 1845 pour établir les conditions des traités entre les compagnies du gaz et la ville de Paris. Dans ce comité d'experts, François Arago sera accompagné de Louis Charles Mary (1791-1870), polytechnicien et Inspecteur des Ponts et Chaussées, et de Léonor Fresnel, polytechnicien, lui aussi ingénieur des Ponts et Chaussées. Nommé secrétaire de la Commission des phares, ce dernier, comme son frère Augustin qui l'a précédé à ce poste, a œuvré à la signalisation maritime de la France et peut être considéré comme un spécialiste des questions d'éclairage. Les expériences réalisées conduiront aux résultats qu'un bec de ville consommant 100 litres de gaz par heure est en mesure de fournir la lumière de 0,77 *carcel*, valeur portée à 1,10 *carcel* pour une consommation de 140 litres et à 1,72 *carcel* pour une dépense de 200 litres⁸⁹. C'est à partir de ces résultats que sera rédigé, dans le traité de 1846, le cahier des charges établissant les obligations des compagnies du gaz vis à vis de la Ville pour une durée de dix-huit années.

Ces impératifs qui subordonnent la puissance éclairante à la consom-

87. « Rapport de la Commission d'éclairage par le gaz », Paris, Lottin de Saint-Germain, 1842, 1.

88. Sur les questions de salubrité et de pollutions industrielles au XIX^e siècle, voir les travaux de Geneviève Massard-Guilbaud, *Histoire de la pollution industrielle. France, 1789-1914*, Paris, Éditions de l'EHESS, 2010.

89. Pour être complet, il faudrait indiquer la pression du gaz, comprise, selon d'Hurcourt, entre 15 et 20 mm (d'eau).

mation volumétrique des becs incitent aux améliorations techniques de ces derniers. Elles sont le fruit d'inventeurs d'origines et de formations diverses comme Marcellin Jobard (1792-1861) lithographe, journaliste et inventeur belge, directeur du Musée royal de l'industrie à Bruxelles. C'est ainsi que Jobard, ami du baron Séguier (Pierre-Armand Séguier, 1803-1876), membre libre de l'Académie des sciences de Paris, soumet son invention à l'examen de la Compagnie. L'innovation de Jobard consiste à entourer le bec d'une enveloppe de verre en forme de *vase Médicis*. Ainsi, l'air extérieur aspiré par le tirage créé par la flamme se réchauffe dans l'espace annulaire entre le vase et la cheminée. La densité de l'air diminuant, la quantité d'oxygène utilisée à la combustion est plus faible, ce qui nécessite un débit de gaz plus faible. La quantité de lumière diminue mais plus faiblement que le débit du gaz, d'où une importante économie évaluée à près de 30%. L'Académie confie l'expertise de l'appareil à une commission formée d'Anselme Payen, de Jacques Babinet et du baron Séguier. Babinet et le constructeur d'instruments Duboscq vont se charger des mesures du pouvoir éclairant en utilisant le « photomètre à pile de glaces » qu'ils ont conçu et fabriqué. Dans son rapport lu en séance le 21 novembre 1853, rapport portant sur le bec d'éclairage de Jobard, Payen exprime clairement cette nécessité d'un contrôle de la quantité de lumière, fournie au client, mais sans que celle-ci ne soit explicitement définie.⁹⁰

» Enfin, tandis que les intérêts du fabricant de gaz et celui de l'acheteur peuvent être divergents lorsque les marchés se font au volume, ces intérêts tendront à un seul et même but lorsque la principale base des transactions sera la quantité de lumière produite (1)

Et Payen ajoute en note :

(1) Aux obligations imposées actuellement, et faciles à vérifier, de la pureté du gaz, des relations convenables entre les diamètres des tuyaux, la pression et la quantité de gaz pour un certain nombre de becs, du nombre de trous pour chaque sorte de bec, de la dimension des flammes, enfin du volume mesuré aux compteurs, garanties parfois illusoires, en tous cas insuffisantes, on pourra ajouter, comme se propose de le faire l'Administration de la ville de Paris, la condition importante du pouvoir éclairant sous une pression ordinaire ; on trouvera sans doute utile d'y joindre l'indication des moyens et des appareils de vérification appropriés à ce but.

90. « Rapport sur un nouveau bec à gaz d'éclairage de M. JOBARD. (Commissaires, MM. Babinet, Segulier, Payen rapporteur.) », *CRAS*, 1853, tome 37, n°21, p. 769-775.

La revendication de Payen est claire : la mesure du pouvoir éclairant et la description des instruments dédiés à cette mesure doivent devenir des obligations imposées aux manufacturiers, en ce moment où l'industrie de l'éclairage est vivement encouragée par le chef de l'État, l'Empereur des Français, Napoléon III lui-même, qui a promis la lumière au plus grand nombre. Dans sa revue *Cosmos*, l'abbé Moigno (François Napoléon Marie Moigno dit l'abbé Moigno, 1804-1884) ajoute en écho ce commentaire :

Espérons, du moins que l'apparition du nouveau photomètre industriel de M. Babinet fera époque dans l'industrie capitale de l'éclairage, qu'il entrera dans les habitudes du commerce du gaz, des huiles, des bougies, des chandelles. Il est aussi absurde d'acheter une matière destinée à l'éclairage sans régler son prix sur son pouvoir éclairant que d'acheter du pain sans le peser, du drap sans le mesurer, etc.⁹¹

La remarque de Moigno a de quoi interroger : la présentation du photomètre de Babinet devant l'Académie des sciences, en cette fin du mois de novembre 1853 correspond-elle dans l'histoire de la photométrie à l'aube d'une période nouvelle, à une véritable rupture ? Resté jusqu'à présent dans l'enfance de l'art, ce champ de l'optique instrumentale se trouve maintenant doté d'un véritable instrument de mesure : la méthode de Babinet, rendue « pratique » dans les ateliers *Soleil et Duboscq* a donné naissance à cet instrument que l'on peut enfin appeler « photomètre », qui plus est « industriel ». Mais cette méthode fait-elle nouveauté ? Moigno ne se félicite-t-il pas tout simplement de voir la méthode polariscopique, employée jusqu'alors en photométrie astronomique et pour l'étude de l'atmosphère, s'appliquer désormais au commerce du gaz d'éclairage ? Car, à n'en point douter, sous la plume de Moigno, l'épithète « industriel » ne peut être prise dans un sens dépréciatif quand il s'agit, pour le jésuite, de souhaiter l'entrée de la photométrie dans le grand mouvement d'industrialisation du pays.

Dans le tome VI de son *Encyclopédie des progrès des sciences*, Moigno, en vulgarisateur consommé, poursuit son enquête sur l'industrie de l'éclairage et rend compte de l'expertise du pouvoir éclairant du gaz de tourbe, commandée en 1855 à Léon Foucault, qui vient d'être nommé physicien près l'Observatoire de Paris⁹². À cette occasion, Foucault présente un nouvel instrument qu'il appelle « Photomètre à compartiment ». La tourbe se forme

91. François Moigno, « Académie des sciences, séance du 21 novembre 1853. », *Cosmos, revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des sciences*, tome 3, p. 696.

92. Léon Foucault, « Rapport sur le pouvoir éclairant des produits gazeux fournis par la distillation de la tourbe », Paris, Wiesiner, 1855.

par la décomposition des végétaux dans les zones humides. Extraite de l'eau (c'est le travail des *épouisseurs*) puis convenablement séchée, elle fournit un combustible apprécié surtout dans les pays du Nord où ses gisements sont abondants. En France, la ressource, présente notamment en Picardie suscite un regain d'intérêt chez les industriels du gaz⁹³. La distillation s'effectue en deux temps : une première distillation en cornue fournit un gaz que l'on recueille dans un gazomètre et un liquide oléagineux, l'huile de tourbe. La distillation de cette huile produit un gaz beaucoup plus riche que celui issu de la première distillation. Le mélange de ce gaz riche et du gaz pauvre fournit le « gaz moyen » qui est proposé à la consommation et il s'agit désormais de comparer le pouvoir éclairant de ce mélange avec celui du « gaz courant provenant de la distillation de la houille »⁹⁴.

Pour cette étude, Foucault ne fait pas confiance à la méthode des ombres, selon Rumford, car elle ne répond pas de façon satisfaisante aux critères de répétabilité et de reproductibilité. Il écarte aussi les photomètres travaillant en lumière polarisée, selon les principes découverts par Arago, en particulier le photomètre à pile de glaces, construit par Duboscq et utilisé par Babinet pour expertiser le nouveau bec de Jobard. Il juge aussi réhébitorie l'utilisation d'une source auxiliaire, en plus des deux sources à égaliser, préférant faire comparaître les deux flammes simultanément devant l'appareil⁹⁵. Foucault veut pour l'industrie du gaz un appareil simple tant dans son principe que dans son emploi.

Le nouvel appareil ne requiert aucune des subtilités de l'optique moderne ; la manière dont il fonctionne est accessible à tout le monde ; il isole et rapproche les éclairagements des sources proposées, il permet de les ramener à l'égalité par de simples variations de distance, et il fournit par suite le moyen d'évaluer en nombre les pouvoirs éclairants : le tout se réalise au moyen d'une simple boîte qu'en raison de son emploi et de sa construction j'appellerai *photomètre à compartiments*.⁹⁶

La boîte évoquée par Foucault est un parallélépipède rectangle, partagé, dans le sens de la longueur, en deux compartiments égaux. Cette séparation est assurée par une cloison métallique (représentée par D, figure 3.7), noircie sur

93. Sur ce sujet, voir Pelouze, [PP39], p. 252-267

94. Cosmos, 3^e année, 1855, tome 6, p. 593.

95. Sans doute aussi les disparités entre les valeurs fournies par le photomètre de Babinet et signalées dans le compte-rendu de Moigno (Moigno, *ibid.*, p. 597.) ont-elle influencé ce choix.

96. L. Foucault, *Recueil des travaux scientifiques*, Paris, Gauthier-Villars, 1878, p. 102.

les deux faces et qu'il est possible de déplacer selon l'axe longitudinal. Le fond de la boîte, qui est la face d'observation, est percée d'une ouverture, en général circulaire, recouverte d'un écran translucide (représenté par E, figure 3.7). La face en vis à vis est ouverte pour laisser pénétrer les lumières émises par les deux sources (S_1 et S_2 figure 3.7) à comparer. L'instrument est placé de telle sorte que le diaphragme D soit sur la bissectrice de l'angle formé par les deux sources S_1 et S_2 et le centre de l'écran d'observation.

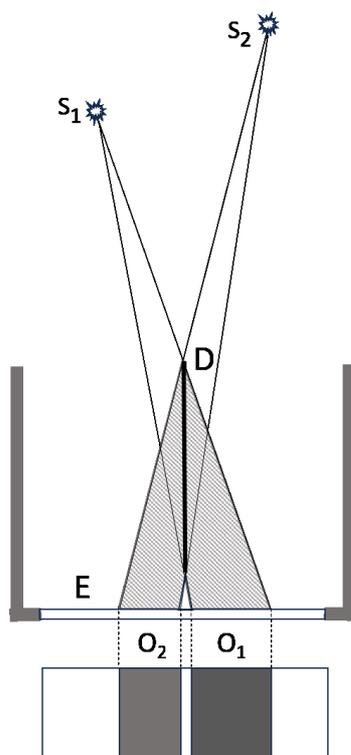


fig. 3.7 – Schéma de principe du photomètre de Foucault.

Ainsi obtient-on les deux ombres de la cloison D, portées sur l'écran, l'ombre O_1 correspondant aux rayons de la source S_1 interceptés par D et l'ombre O_2 correspondant à ceux de la source S_2 . Lorsque l'appareil n'est pas réglé, une ligne blanche sépare les deux ombres dont les bords sont nets. Un système formé d'un bouton coulissant dans une glissière ménagée sur la paroi supérieure de la boîte permet de déplacer la cloison D et d'amener précisément les deux ombres au contact l'une de l'autre. Foucault certifie l'extrême sensibilité de la méthode :

On saisit alors avec une facilité surprenante le moindre excès d'intensité d'un rayonnement sur l'autre, et comme on dispose des

positions des deux flammes, on arrive à déterminer avec précision les distances respectives qui égalisent à l'oeil les deux moitiés du champ, en faisant disparaître leur limite commune.⁹⁷

Afin d'assurer au mieux la répétabilité et la reproductibilité des pointés, Foucault va apporter un soin particulier à la préparation de l'écran d'observation. Il faut en effet un écran translucide et parfaitement diffusant de façon à rendre les effets optiques, causés par la réflexion spéculaire, aussi faibles que possible.

Le choix d'un bon écran n'était pas sans importance : en le formant d'une couche mate et fortement diffuse, on rend l'appréciation des intensités lumineuses à peu près indépendante du lieu de l'observation. On peut, sans bouger la tête, se servir indifféremment d'un oeil ou de l'autre ; on peut, par conséquent, observer avec les deux yeux à la fois, ce qui permet d'asseoir le jugement d'une manière plus certaine.⁹⁸

La réalisation d'un écran qui diffuse par transmission la lumière, de façon satisfaisante est délicate. Les diffuseurs utilisés traditionnellement en photométrie, comme le papier huilé ou le verre dépoli, présentent souvent deux défauts : 1°/ leur degré de translucidité peut varier très inégalement d'un point à un autre ; 2°/ ils présentent plus de transparence qu'il n'en faut alors qu'un bon diffuseur ne doit pas laisser passer les rayons directs émis par les sources. Pour obvier à ces défauts, Foucault utilise une suspension d'amidon de blé dans l'eau, déposée sur une lame de verre. La protection de cette couche diffuse est assurée par une seconde lame de glace, séparée de la première par de fines bandes de papier collées le long des bords. La méthode de Foucault semble suffisamment robuste pour qu'André Crova (1833-1907), trente ans après cette invention, émette ce commentaire dans les *Annales de physique et de chimie* :

Cet écran est très commode et très sûr ; il donne une grande uniformité d'éclairement quand on le place dans un champ lumineux constant, ne modifie pas la teinte de la lumière incidente et ne s'altère pas avec le temps.⁹⁹

Mais quel que soit l'instrument utilisé : photomètre à ombres de Rumford, photomètre à piles de glaces de Babinet ou photomètre à compartiment de

97. L. Foucault, *ibid.*, p. 101.

98. L. Foucault, *ibid.*, p. 102.

99. A. Crova, « Emploi des écrans diffusants en photométrie », *ACP*, 1885, sér. 6, tome 6, p. 342-357.

Foucault, la question de l'expression absolue du pouvoir éclairant d'un gaz reste toujours soumise au choix d'une unité, choix que se réserve chaque auteur ou chaque commission au gré des circonstances. Si Pouillet, dans son expertise du gaz de résine exprime le pouvoir éclairant en carrels, Babinet, Payen et Séguier, dans leur étude du bec de Jobard choisissent la lumière bien fixe d'une bonne lampe dite « modérateur », Foucault, quant à lui, se tourne vers une « unité suffisamment constante et facile à se procurer en tout temps »¹⁰⁰ : la bougie stéarique, dite « de l'Étoile » (supra p.160). Foucault sait pertinemment que cette lumière est trop changeante pour être qualifiée d'unité lumineuse mais il a aussi constaté qu'en rassemblant en faisceau plusieurs bougies, on obtient une source multiple dont la flamme offre une stabilité permettant la comparaison photométrique.

Des bougies au nombre de sept se groupent naturellement en faisceau hexagonal, et si l'on a soin de maintenir entre elles une distance d'un centimètre, on trouve qu'elles brûlent avec une remarquable fixité ; des courants d'air s'établissent qui tendent les flammes et leur donnent plus de stabilité que lorsqu'elles brûlent isolément.¹⁰¹

Toutes ces précautions prises, le rédacteur scientifique du *Journal des Débats* est en mesure d'annoncer en nombres de bougies les pouvoirs éclairants du gaz de tourbe et du gaz de la Ville, soit : 23 bougies $\frac{1}{4}$ pour le gaz de tourbe contre 6 bougies $\frac{8}{10}$ pour le gaz de la Ville. En attribuant la valeur 100 au pouvoir éclairant du gaz de la Ville, un calcul simple conduit à la valeur 342 pour celui du gaz de tourbe, la comparaison directe des deux gaz conduisant à la valeur 331, soit un écart entre les deux estimations de $\frac{1}{30}$.

Les progrès de la photométrie, au début de la seconde moitié du siècle, se manifestent par la création d'une instrumentation industrielle dans des laboratoires spécialisés comme celui de « l'usine expérimentale de la Villette », créée à l'instigation de Victor Regnault. Véritable fondation qui n'eût pas été possible sans le ferme soutien du pouvoir exécutif, en la personne de l'Empereur Napoléon III et les capitaux de deux investisseurs aguerris, les frères Émile (1800-1875) et Isaac Péreire (1806-1880). L'Empereur est d'autant plus impliqué qu'il a promis aux Français « la vie à bon marché » et l'accès à la nouvelle énergie, le gaz, pour un prix modeste qu'il convient de déterminer, sans pour autant léser les investisseurs. En 1854, le pouvoir confie cette mission à une commission composée de quatre académiciens réputés : Victor Regnault, Michel-Eugène Chevreul, Arthur Morin (1795-1880) et Eugène

100. Léon Foucault, [Fou78], p. 103.

101. L. Foucault, *ibid.*, p. 103.

Péligot (1811-1890). Dans son hommage au premier, à l'occasion de son centenaire, Henry Le Chatelier (1850-1936) fournit une vision détaillée du rôle joué par Regnault dans la structuration de l'industrie gazière.¹⁰² L'académicien, auquel l'Empereur ne refuse aucun moyen, peut utiliser un atelier expérimental de distillation, près de la Manufacture de Sèvres dont il est désormais le directeur, après le décès brutal de l'administrateur général du prestigieux établissement, Jacques-Joseph Ebelmen (1814-1852). Les expériences sont faites dans un fourneau contenant cinq cornues, en suivant scrupuleusement les consignes de celui qui est considéré comme l'un des meilleurs spécialistes des machines à feu. Regnault qui préside la commission ne plaisante pas. Il fait chaque jour peser le combustible chargé dans les cornues, les produits liquides et solides de la distillation, coke, goudron, eau ammoniacale et mesurer, évidemment, le volume de gaz obtenu. Pour éviter toute fraude, il profite de la proximité de Sèvres avec la résidence impériale de Saint-Cloud et mobilise les chasseurs de la garde pour qu'ils veillent à la sécurité du laboratoire et empêchent, baïonnette au canon, toute intrusion pendant les absences des membres de la commission. Les résultats des expériences de Sèvres rebattent les cartes : à qualités égales, les quantités de houille qui alimentent le fourneau de Regnault sont cinq à six fois plus faibles que celles annoncées par les compagnies, ce qui amène à un prix de revient du gaz, du seul fait des matières premières, de deux centimes et demi ! D'Hurcourt, dont les publications font autorité dans la profession, fulmine et dénonce, calculs à l'appui, dans la seconde édition de son traité (1863), les distorsions entre les résultats des savants et ceux des hommes de l'art qui œuvrent chaque jour à l'usine¹⁰³. Les investisseurs tant français qu'étrangers, en particulier britanniques, lui emboîtent le pas et mettent violemment en cause les chiffres avancés par la Commission de Saint-Cloud et les compétences de Regnault.

En juillet 1855, les frères Péreire se manifestent, déclarent accepter les conclusions de Regnault et se font fort d'abaisser le prix du gaz à 30 centimes quand les compagnies existantes proposent une livraison pour pas moins de 40 centimes. Promoteurs des premiers projets ferroviaires du pays, en particulier de la ligne de Paris à Saint-Germain en Laye, ces investisseurs avisés ont su s'entourer des conseillers techniques les plus habiles, la plupart polytechniciens, passés par l'École des ponts et chaussées, adhérents de « la pensée industrialiste et humaniste de Saint-Simon » (Claude-Henri de Rou-

102. Henry Le Chatelier, « Victor Regnault Discours prononcé à l'occasion du centenaire de la naissance de l'illustre physicien, dans la cérémonie commémorative du 18 décembre 1910, au Collège de France. », *Annales de l'École des mines*, 1911, tome 19, p. 49-63.

103. E. Robert d'Hurcourt, *De l'éclairage au gaz*, seconde édition, Dunod, Paris, 1863, p. 236-271.

vroy, comte de Saint-Simon, 1760-1825)¹⁰⁴. On ne saurait donc comprendre l'adhésion soudaine des Péreire au projet gazier, sans que soit évoqué, ainsi que l'explique Henry Le Chatelier, le rôle de conseiller technique joué auprès des Péreire par Louis Le Chatelier (1815-1873, le propre père d'Henry), lui aussi polytechnicien, passé par l'École des mines, ami de Regnault. Les bailleurs de fonds inespérés vont injecter de l'argent frais (15 millions de francs) dans le capital de la Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz, la nouvelle entreprise issue de la fusion des six sociétés gazières opérant jusqu'alors dans la capitale.

L'une des premières décisions des actionnaires de la nouvelle compagnie est de choisir Victor Regnault comme conseiller scientifique moyennant de confortables émoluments, la promesse de moyens très importants dont l'usage des équipements scientifiques et techniques d'une usine expérimentale qui s'installera sur le site de *la Villette*¹⁰⁵. La Compagnie n'est pas seulement guidée par le souhait de s'attacher Regnault à tout prix mais par la volonté d'apporter dans ses usines les moyens d'améliorer leurs procédés (nous dirions aujourd'hui *process*) « pour aller au-devant de la pensée de l'Administration, manifestée par l'article 11 du cahier des charges, lequel, en prévoyant les progrès de la science, a voulu en assurer l'application par notre société, (...) »¹⁰⁶. Il ne s'agit donc plus, selon les termes des accords entre l'Administration et la Compagnie, de se contenter de livrer un gaz convenablement épuré et dont le pouvoir éclairant correspond aux déterminations de 1845, le fournisseur doit aussi se donner les moyens d'une veille technologique et implémenter dans ses établissements les procédés les plus récents de distillation et d'épuration, en vue d'abaisser ses coûts et le prix facturé à la Ville et à ses abonnés. Les progrès constatés donneront lieu à la réactualisation des traités, à la fin de la concession.

Que ce soit dans le département de la Seine ou dans les villes de provinces qui souhaitent également profiter de la nouvelle énergie, les traités conclus entre les municipalités et leurs fournisseurs obligent donc les parties à déployer des moyens de contrôles adaptés : les premières pour contrôler l'efficacité de l'éclairage diffusé sur la voie publique, les seconds pour le maintien du pouvoir éclairant dans les limites du traité et le contrôle de l'épuration, en particulier de l'élimination du sulfure d'hydrogène. Le cas parisien est emblématique de cette démarche qui conduira à l'établissement de l'une des

104. Clément Coste, Claire Silvant, « Les frères Péreire, financiers Saint-simoniens », *L'économie politique*, 2021/1, n° 89, p. 99-112.

105. Émile et Isaac Péreire, « Première assemblée générale du 7 mars 1857 », *Œuvres, série J, Histoire de la Compagnie parisienne du gaz*.

106. E. et I. Péreire, *ibid.*

premières normes industrielles définissant, avec une précision et une rigueur jusqu'alors inégalées, les méthodes photométriques de contrôle du pouvoir éclairant. Démarche d'autant plus nécessaire que les contrôles ordonnés par le Préfet de police en 1856 montrèrent l'impossibilité d'atteindre avec le gaz distribué à la Ville, le pouvoir éclairant défini dans le traité de 1845, à partir des résultats obtenus par Arago, Fresnel et Mary (supra p.165). On sollicite une fois encore les meilleurs chimistes : pour la Ville, c'est Jean-Baptiste Dumas qui interviendra avec d'autant plus de zèle qu'il est aussi sénateur et président du Conseil municipal ; pour la Compagnie officiera évidemment son conseiller scientifique, Victor Regnault. Les expériences nombreuses vont mobiliser un personnel qualifié. À la Sorbonne, Dumas est assisté d'Henri Étienne Paul Bérard (1836-1921), le fils de l'académicien Jacques-Étienne Bérard (voir infra, chapitre 2). Paul Bérard est aussi le chef des travaux chimiques de la Faculté des sciences de Paris¹⁰⁷. Spécialiste de la chimie industrielle, il enseigne à l'École Turgot, première *École primaire supérieure* ouverte aux enfants des « classes populaires supérieures » pour leur offrir, à la sortie de l'école primaire, un enseignement scientifique et pratique. Les professeurs, comme ceux d'histoire naturelle et de chimie, y sont choisis parmi des « hommes de laboratoire »¹⁰⁸. Quant à Regnault, il est secondé par Paul Audouin (Paul Marie Eugène Audouin, 1835-1920), jeune ingénieur des Arts et Manufactures, Chef des travaux chimiques de la Compagnie Parisienne du Gaz¹⁰⁹.

Les premiers travaux vont consister à vérifier les résultats de la Commission Arago, obtenus en 1845. Les nombreux essais de distillation effectués à l'usine expérimentale de la Villette, sur des houilles de provenances très diverses montrent que seule celle extraite des houillères de Commentry (dans le département de l'Allier) permet d'atteindre le pouvoir éclairant fixé par le traité de 1845. Or c'est justement la houille de ce gisement qui a été utilisée, dix ans plus tôt par Arago, tandis que depuis, la Compagnie parisienne fournit son gaz à partir des « houilles ordinaires du Nord, de Belgique et d'Angleterre », d'où les écarts observés. Comme l'expliquent Audouin et Bé-

107. Il deviendra le préparateur de Balard et de Pasteur.

108. Sur le public et les enseignements de l'École Turgot et des Écoles primaires supérieures, lire Renaud d'Enfert, « École du peuple et scolarisation post-élémentaire », *Revue d'histoire du XIX^e siècle*, n° 55, 2017/2, p. 43-57.

109. Neveu par alliance de Jean-Baptiste Dumas, le jeune chimiste a déjà eu le privilège de voir se pencher sur son berceau deux présidents de l'Académie des sciences, Dumas et Adolphe Théodore Brongniart (1801-1878) qui furent les *témoins* de sa naissance. Cette proximité n'est certes pas rare à une époque où le cercle des chercheurs scientifiques est des plus réduits et où le choix des carrières se détermine souvent en fonction des ambitions familiales.

rard, la révision du traité va être rendue possible grâce à « l'extension du service de la Compagnie Parisienne à l'éclairage des communes suburbaines, annexées à l'ancien Paris »¹¹⁰. Mais il reste encore à déterminer les conditions d'utilisation du gaz les plus avantageuses tant sur l'espace public que chez les abonnés. L'esprit de l'étude commandée à l'équipe de Dumas et Regnault est clairement exprimé par Audouin et Bérard :

Le point de départ des nouvelles études était emprunté à un point de vue purement municipal. Le gaz remplace l'huile pour l'éclairage. Il y a des droits d'octroi sur l'huile à brûler et sur la houille employée à la production du gaz ; ils doivent être équilibrés dans une certaine mesure. D'un autre côté, en considérant l'intérêt des consommateurs, il paraît naturel de prendre comme terme de comparaison le bec à huile dont il est généralement fait usage, pour établir la valeur du bec de gaz qu'on met à leur disposition.¹¹¹

Ce point de vue dirige donc le choix de la lumière type : celle émise par une lampe Carcel à laquelle sera égalée la lumière du bec type. Ce dernier doit permettre la combustion du gaz dans un double courant d'air comme cela se réalise pour l'huile dans la lampe Carcel. Le choix se porte sur un bec dit « Bengel » dont la particularité est un panier en porcelaine, percé de trous permettant la ventilation de la flamme sur son pourtour. Les deux lumières de référence étant égalisées, on note scrupuleusement la consommation en huile de la Carcel et celle en gaz du bec Bengel, ce qui fournit « les équivalents de l'huile et du gaz employés sous le rapport du pouvoir éclairant »¹¹². Quant au photomètre, il s'agit de l'appareil de Foucault utilisé sur le bec type et le bec en essai. La campagne de mesures doit en effet déterminer lequel, de tous les becs en usage, est le plus avantageux pour le consommateur. Les brûleurs déposés chez la clientèle sont essentiellement de trois types : le bec dit « bougie » dont le bouton¹¹³ est percé d'un trou unique, ce bec est surtout utilisé pour sa faible dépense, quand on veut peu de lumière ; le bec à fente dit « papillon » qui offre une flamme plus étendue en largeur ; le bec dit « Manchester » dont la tête est formée de deux boutons en vis à vis, orientés vers le sommet de leur angle : les deux flammes se combinent

110. P. Audouin, P. Bérard, « Étude sur les divers becs employés pour l'éclairage au gaz et recherches des conditions les meilleures pour sa combustion », *ACP*, 1862, sér. 3, tome 65, p. 423-495.

111. P. Audouin, P. Bérard, *ibid.*, p. 425.

112. P. Audouin, P. Bérard, *ibid.*, p. 426.

113. La pièce en acier ou en laiton qui ferme la conduite de gaz et qui est percée de l'orifice de sortie du gaz.

en une flamme unique dont le pouvoir éclairant est plus de deux fois celui de chaque flamme prise isolément¹¹⁴. Ici aussi, les essais sont nombreux car chaque paramètre est déterminant : le diamètre du trou que l'on fait croître de dixième de millimètre en dixième de millimètre ; la largeur de la fente que l'on fait varier de la même façon, la pression du gaz, la dépense (le volume de gaz brûlé pour la pression donnée), la quantité d'air offert à la combustion... Dans cette expertise technique, l'empirisme domine et il est bien difficile de tirer des lois phénoménologiques de la quantité de données obtenue. Audouin et Bérard vérifient quand même que, quel que soit le bec, le pouvoir éclairant est d'autant plus grand que la pression est plus faible : « Pour tous les becs et pour toutes les dépenses, le maximum de lumière correspond à 2 ou 3 millimètres de pression »¹¹⁵, loi déjà soulignée par Jeanneney. De la même façon, le pouvoir éclairant augmente avec la dépense, c'est à dire avec le diamètre de l'orifice et la largeur de la fente du brûleur, jusqu'au moment où le carbone est en excès dans la flamme qui devient fuligineuse. Inversement, le pouvoir éclairant diminue avec la quantité d'air consommé dans la combustion, ce qui se traduit par le bleuissement de la flamme¹¹⁶.

Cette étude systématique des becs commerciaux autorise Audouin, Bérard, Dumas et Regnault à définir le protocole de mesure du pouvoir éclairant du gaz distribué par la Compagnie. La fin de leur mémoire publié dans les *Annales de chimie et de physique* se termine ainsi par cette note :

Il a paru nécessaire de compléter les résultats énoncés dans le Mémoire qui précède en publiant ici l'instruction que MM. Dumas et Regnault ont formulée pour l'essai du gaz. Après avoir été adoptée par la ville de Paris qui en obtient les meilleurs résultats, elle l'est successivement par beaucoup d'autres grandes villes¹¹⁷.

L'« instruction pratique » que Dumas et Regnault ont formulé pour l'essai au gaz tient sur une dizaine de pages et passe en revue chaque détail de la vérification des instruments, de la préparation de l'essai et de sa réalisation. En exorde de ce manuel, Audouin et Bérard fournissent la description du banc photométrique construit pour la ville de Paris par Louis-Joseph Deleuil (1795-1862). Récompensé à l'occasion des expositions universelles de Londres (1851) et Paris (1855), spécialiste des étalons de masse et des balances de précision, le constructeur a notamment fourni une balance de sa fabrication en

114. Il faut compter 50% d'augmentation du pouvoir éclairant.

115. P. Audouin, P. Bérard, *ibid.*, p. 484.

116. Le carbone est oxydé en gaz carbonique par l'oxygène en excès et ne peut plus participer à l'incandescence dans la flamme. La combustion est complète.

117. P. Audouin, P. Bérard, *ibid.*, p. 485.

vue de la pesée de l'huile consommée par l'étalon Carcel, pendant la durée de l'essai¹¹⁸. Un compteur à gaz fournit, pour la même durée, la dépense du luminaire en essai. La description de chaque instrument, en particulier celle de l'étalon Carcel et celle du bec type, est millimétrée, comme les « conditions de la mèche » : une mèche moyenne dite « des phares » dont la tresse comporte 75 brins, pour une masse linéique de 3^{gr}, 6 par décimètre de longueur ! Les instruments doivent être soigneusement conservés, en particulier les becs types qui doivent être placés « sous scellés ». Chaque étape de l'essai est minutieusement décrite : allumage du Carcel, allumage du bec type, vérification de l'égalité des ombres sur l'écran du photomètre de Foucault¹¹⁹, mesure des consommations, etc.

Le texte de Dumas et Regnault n'a rien à envier aux rapports techniques définissant les normes appliquées aux procédés actuels de contrôle industriel. Ces directives n'ont pas caractère d'obligation. Elles sont incitatives et, surtout, donnent aux fournisseurs de gaz et aux municipalités les moyens de négocier ou renégocier leurs traités. Ainsi, dans le numéro du 21 juin 1863, le *Moniteur universel* ou *Journal officiel de l'Empire Français* publie les termes du nouveau traité entre la ville de Paris et la Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz. La note validée par Georges Eugène Haussmann (1809-1891) préfet du département de la Seine, certifie la conformité du gaz au cahier des charges, démontrée par les contrôles journaliers, effectués au cours du premier trimestre de l'année, en suivant les préconisations de Dumas et Regnault. Émile Durand, directeur du journal *Le Gaz* s'empresse d'informer ses lecteurs de l'heureuse issue de la négociation parisienne, amenée à devenir l'exemple à suivre pour les villes de province. Car l'enjeu est important pour ce public *éclairé* : commerçants, artisans et entrepreneurs pour lesquels l'éclairage de leur établissement est primordial. L'instruction de Dumas et Regnault, définissant la méthode de contrôle journalier du pouvoir éclairant se trouve ainsi officialisée et presque promue au rang de norme nationale. Durand peut annoncer :

Grâce aux travaux de MM. Dumas et Regnault, membres de l'Institut, nous possédons donc enfin une mesure-type du pouvoir éclairant du gaz, et l'empressement avec lequel municipalités et compagnies adoptent les conditions lumineuses déterminées par ces deux illustres savants, nous fait espérer qu'avant peu le type

118. Pour tous les essais, la consommation est fixée à 42 grammes d'huile par heure, avec une tolérance de ± 4 g. Si la consommation se trouve en dehors de l'intervalle, l'essai est à recommencer.

119. Le pointé est amélioré en réduisant le champ d'observation au moyen de petites lames mobiles, actionnées par une vis.

de leur choix sera le seul étalon légal de la lumière du gaz en France.¹²⁰

L'optimisme de Durand n'empêche pas que la réception de la méthode n'est pas unanime, en raison de son coût. La dépense pour un banc photométrique de Dumas et Regnault est évaluée par Durand à 1500 francs environ¹²¹. Mais ce n'est pas tout, le contrôle du pouvoir éclairant suppose l'aménagement d'un laboratoire de photométrie, tant dans les usines de production que dans les bâtiments municipaux, installation que les villes desservies par un réseau gazier, ne sont pas toutes prêtes à s'offrir. Ces difficultés n'empêchent pas que la photométrie devient incontournable dans l'industrie gazière, ainsi qu'en témoigne le *Traité d'éclairage par le gaz* de Nikolaus Heinrich Schilling (1826-1894) qui donne une description détaillée de l'usine d'Eger¹²² : on y remarque le laboratoire de photométrie au centre du bâtiment réservé au contremaître et aux techniciens de l'usine :

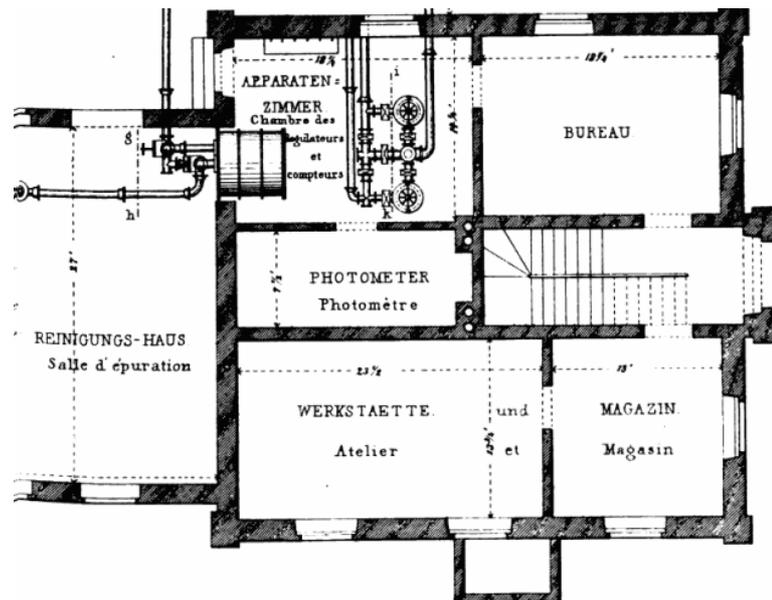


fig. 3.8 – Plan d'une partie de l'usine d'Eger, tiré de N.H. Schilling, *Traité d'éclairage par le gaz*, Paris, Munich, 1868, pl. LXIX.

120. E. Durand, *Étalon légal ou mesure type du pouvoir éclairant du gaz d'après les travaux de MM. Dumas et Regnault membres de l'Institut.*, 2^e édition, Paris, 1869, p. 5.

121. On peut considérer que le prix de cet ensemble instrumental représenterait, à l'époque, 25 fois le salaire mensuel d'un ouvrier et environ 20000 € d'aujourd'hui.

122. Il s'agit de la ville de Cheb dans l'actuelle Tchéquie.

La chambre du photomètre se trouve située à côté de celle des appareils, avec laquelle elle communique, et elle est complètement obscure lorsqu'on ferme la porte. Elle renferme une table de photomètre, un compteur d'expérience, un photomètre de Bunsen, avec des branchements de gaz sur la fabrication, sur les gazomètres et sur la ville, un compteur à secondes et les autres ustensiles nécessaires aux expériences photométriques. Cette chambre a 5^m,47 de longueur et 2^m,25 de largeur.¹²³

L'instrument utilisé dans le laboratoire qui sert d'exemple à Schilling est le photomètre de Bunsen (Robert Wilhelm Bunsen, 1811-1899). Cet instrument est formé d'un petit écran de papier placé entre les deux luminaires à comparer. Une partie de l'écran est rendue translucide en étalant sur une petite surface un corps gras, de la paraffine ou de l'alcool amylique (essence de pomme de terre). Lorsque la tache est observée par transmission du côté de la source la plus faible, elle apparaît brillante sur un fond sombre ; si on la regarde par réflexion de l'autre côté, elle paraît sombre sur un fond clair. L'égalité des éclairagements se traduit par la disparition de la tache et l'uniformité de l'écran¹²⁴. L'égalisation est assez « sensible » et cette méthode est fréquemment adoptée en Angleterre sous le nom de « *grease spot photometer* ». D'Hurcourt signale également l'adoption du photomètre de Bunsen par la commission de la ville de Liège, chargée en 1854 de la mesure du pouvoir éclairant du gaz fourni à la ville¹²⁵. Il mentionne aussi la supériorité de l'appareil qui, selon lui, résout la question de la différence des teintes, observée entre la lumière du gaz et celle de la bougie qui sert d'unité. À l'opposé, Durand, dans les publications qu'il destine aux cadres de l'industrie du gaz déclare :

A notre avis, il est fort difficile de reconnaître avec cet appareil le point exact de l'égalité des deux lumières comparées ; la préparation de l'écran donne au papier deux teintes différentes, deux nuances de blanc d'une difficulté d'appréciation fort difficile à la vue ; cet avis était partagé par feu Jeanneney qui a laissé un nom fort estimé dans l'industrie du gaz.

L'emploi de cet appareil ne peut être confié qu'à des hommes ha-

123. N.H. Schilling, *Traité d'éclairage par le gaz*, traduit de l'allemand par Edmond Servier, Paris, Munich, 1868, p. 279.

124. Une théorie complète du photomètre de Bunsen est fournie par Palaz, [Pal92], chap. 1, p. 31-38.

125. E. Robert d'Hurcourt, *De l'éclairage au gaz*, seconde édition, 1863, p. 47.

biles, expérimentés ; il n'est pas d'un maniement facile, pratique, et, à ce titre, nous ne saurions en recommander l'usage.¹²⁶

Mais la question n'est pas tant l'instrument de mesure que le choix de la « lumière type ». Comme le rappelle Schilling : « Le côté le plus faible de la photométrie réside dans la flamme type. »¹²⁷ Faute de mieux, il propose la bougie stéarique ou de spermaceti, particulièrement prisée au Royaume-Uni, en recommandant, à l'instar de Jeanneney, une détermination précise de la consommation horaire. Il est certain que les conditions draconiennes du réglage de la lampe Carcel ne plaident guère en faveur de sa flamme comme type lumineux. Deleuil, le constructeur minutieux de la balance photométrique utilisée par Dumas et Regnault n'est d'ailleurs pas le dernier à émettre ses critiques sur le type choisi par les deux académiciens :

(...) les nombreux désagréments que celle-ci [la lampe Carcel] m'a causés dans l'entreprise que j'avais à réaliser, m'ont suggéré l'idée d'affranchir un appareil essentiellement pratique d'une cause d'arrêt trop souvent renouvelé. Pénétré du principe sur lequel on s'était fondé pour brûler la quantité d'huile dans un temps déterminé, j'ai cherché s'il ne serait pas possible d'atteindre le même but avec la lampe modérateur. (...) Son prix est incomparablement plus modéré, et sa simplicité est une des causes de son meilleur service. Une telle lampe a été mise à l'essai par M. Servier, ingénieur de la Compagnie parisienne pour le gaz, et a été par lui justement appréciée ; il a pu constater que, lorsque la lampe Carcel refuse le service, la lampe modérateur marche encore dans d'excellentes conditions de régularité de lumière ; c'est donc un perfectionnement qui, pour un appareil pratique, n'est pas sans importance.¹²⁸

La normalisation du contrôle du pouvoir éclairant entamée par Dumas et Regnault devra donc accepter des adaptations locales de part son coût tant en matériel que par la mobilisation presque journalière d'un personnel qualifié. Mais au moins, les difficultés de l'évaluation des luminaires sont-elles clairement identifiées et les méthodes désormais parfaitement définies. Même si la lumière de référence n'est pas encore désignée par la profession, la calibration de ce type est universellement admise qu'il s'agisse de la bougie

126. E. Durand, *Tablettes du directeur d'usines à gaz, contrôle de la qualité du gaz, pouvoir éclairant-épuration*, Paris, 1867, p. 43.

127. N. H. Schilling, [Sch68], p. 50.

128. L. J. Deleuil, *Catalogue des instruments de physique, de chimie, d'optique et de mathématiques*, Paris, Bourdier, 1863, XVII.

stéarique, de la lampe Carcel ou de la lampe à modérateur¹²⁹ que Deleuil se fait fort de transformer en instrument de précision¹³⁰. Schilling le rappelle : on ne peut désormais se contenter de désigner « la bougie normale adoptée en indiquant le nombre de bougies contenues dans la livre et leur longueur approximative (...) Il est bien préférable de déterminer la consommation par heure de la bougie, prise pour type, par des pesées, et de rapporter l'intensité lumineuse à une certaine consommation normale. »¹³¹ Mais c'est bien l'enjeu économique, constitué par le contrôle de la qualité du gaz, autrement dit de son pouvoir éclairant, qui a permis cette maturation de la photométrie industrielle, enjeu autant bien perçu par le pouvoir politique, représenté par le préfet Haussmann que par les investisseurs avisés que furent les frères Péreire.

Si la photométrie possède des outils éprouvés pour la mesure du pouvoir éclairant des flammes, est-elle pour autant équipée pour évaluer la lumière électrique, celle qui jaillit entre les pointes de deux charbons soumis à une différence de potentiel élevée ? Cette lumière adaptée à l'illumination des vastes espaces urbains mais surtout maritimes, va connaître une carrière différente de celle tirée du gaz. Comme ce « soleil artificiel » — selon l'expression de l'époque — atteint le domaine de l'éblouissement oculaire, sa photométrie demande des dispositifs adaptés. À cette fin, Léon Foucault et Hippolyte Fizeau proposeront l'utilisation du daguerréotype¹³² pour comparer la lumière de l'arc voltaïque à la lumière solaire et à la lumière produite par la chaux placée dans la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène¹³³. Ils préciseront toutefois « qu'un procédé photométrique fondé sur les propriétés chimiques de la lumière ne doit être considéré que comme donnant la mesure de l'intensité chimique des sources lumineuses. »¹³⁴ Les études photométriques de la lumière électrique seront davantage le fait d'une recherche académique qu'industrielle. À ce titre, les travaux d'Antoine-Philibert Masson (1806-1860), méritent une attention particulière pour sa contribution au développement de la photométrie des « lumières brèves » et à la construction des instruments pour la mesure de la lumière transitoire de l'étincelle élec-

129. Inventée et brevetée par Félix Franchot (Charles-Louis-Félix Franchot, 1809-1881), la nouvelle « lampe à mouvement rectiligne régularisée » (cote BA5163 de la base des brevets du 19^e siècle de l'INPI) utilise un mécanisme simple, moins capricieux que celui de la lampe Carcel et qui assure aussi l'alimentation de la mèche en huile surabondante.

130. Deleuil, *ibid.*, XVII.

131. N. H. Schilling, [Sch68], p. 51.

132. H. Fizeau, L. Foucault, « Recherches sur l'intensité de la lumière émise par le charbon dans l'expérience de Davy », *ACP*, 1844, sér. 3, vol. 11, p. 370-383.

133. Il s'agit de la lumière « oxhydrique » ou « lumière Drummond ».

134. H. Fizeau, L. Foucault, *ibid.*, p. 371.

trique. Une courte histoire de ce phénomène et de sa réalisation industrielle, l'« arc voltaïque », doit d'abord être rappelée.

3.4 Étincelle électrique - arc voltaïque

Dans son « historique de l'étincelle électrique », Achille Antoine Cazin (1832-1877) sépare les recherches sur l'électricité en deux grandes périodes : la première commencée vers la fin du XVI^e siècle avec l'observation de l'attraction exercée sur des corps légers par l'ambre frottée (William Gilbert (1544-1603)) et qui s'étend jusqu'à la fin du XVIII^e siècle est consacrée à l'« électrostatique » (ou électricité au repos) ; la période qui lui succède et se poursuit jusqu'à l'époque contemporaine est celle de l'« électrodynamique » (ou électricité en mouvement), c'est à dire des courants électriques dans les milieux conducteurs. Les effets lumineux, calorifiques, chimiques et magnétiques des courants voltaïques, découverts et largement exploités feront la prospérité de cette époque féconde. L'année 1800 apparaît ainsi comme la charnière entre ces deux époques¹³⁵. Cette année-là, Alessandro Volta (1745-1827), professeur de physique expérimentale de l'université de Pavie annonce, par un article publié en français dans les *Philosophical transactions of the Royal Society*, les effets électriques obtenus par le simple contact de deux métaux dissemblables¹³⁶. Volta appelle son appareil « Organe électrique artificiel » par similitude avec l'« Organe électrique naturel » supposé présent dans certains animaux, comme la *torpille*¹³⁷, pour expliquer les commotions qu'ils provoquent. La prospérité de l'invention de Volta est largement relatée dans l'histoire de l'électricité : capable d'entretenir un flux continu d'électricité dans un circuit conducteur, la pile de Volta devient un instrument de laboratoire incontournable, d'autant plus qu'il est facile d'augmenter le flux de l'électricité en mouvement et ses effets (commotions) en enchaînant plusieurs couples métalliques dans ce que Volta appelle « un appareil à *couronne de tasses* ». Une amélioration notable est encore apportée par William Cruickshank (?-1810) qui a l'idée de remplacer cette disposition par un appareil de plaques rectangulaires de cuivre et de zinc, plongeant dans une *auge* en bois rainurée, remplie d'une solution conductrice. Il est alors possible d'associer plusieurs dizaines, voire centaines de couples métalliques, permettant d'obtenir des forces électromotrices et des débits très importants. En reliant les deux extrémités d'une colonne d'eau à un appareil de couples voltaïques,

135. A. Cazin, *L'étincelle électrique*, Bibliothèque des merveilles, Paris, Librairie Hachette, 1876, p. 53.

136. Alessandro Volta, « On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds », *Phil. Trans.*, 1800, vol. 90, p. 403-431.

137. La *torpille* est un poisson plat, capable d'induire des chocs électriques par contact.

William Nicholson (1753-1815) et Anthony Carlisle (1768-1842) réalisent la première électrolyse de l'eau. Très vite, à leur suite, les chimistes d'Europe dont Humphry Davy¹³⁸ en Grande-Bretagne et Louis Jacques Thénard en France vont s'emparer de l'invention de Volta. Dans leurs laboratoires, le feu des fourneaux est remplacé par le « feu électrique »¹³⁹ qui par électrolyse casse les molécules et permet d'isoler de nouveaux corps simples. Dès lors, s'engage dans la première décennie du siècle, une course au gigantisme des batteries voltaïques, course financée par des intérêts privés et des sociétés savantes comme en Angleterre, par les pouvoirs publics en France : la dotation de l'École polytechnique par le Premier Consul est emblématique d'une science quittant le domaine amateur pour atteindre celui de ce qu'il est aujourd'hui coutume d'appeler la « big science ».

La partition réalisée par la « révolution voltaïque », selon l'observation de Cazin, semble également s'appliquer entre l'histoire de l'étincelle électrique et celle de l'arc voltaïque. Mais ces deux histoires ne se croisent-elles pas ? Ces deux émanations lumineuses de l'électricité accusent certes des différences : toujours selon Cazin, quelle ressemblance entre la longue étincelle éphémère que l'on sait tirer des bouteilles de Leyde ou « des nuées » et celle vigoureuse, observée au point de rupture d'un circuit alimenté par une batterie de piles voltaïques. Avec une batterie de taille suffisante, on réalise qu'il est possible de produire une lumière électrique dont l'intensité ne serait surpassée que par celle du Soleil et de la maintenir de façon presque permanente. Cette lumière, que l'on nomme l'« arc voltaïque » à cause de la forme qu'elle accuse entre les électrodes reliées aux pôles de la pile, s'accompagne aussi d'un fort dégagement de chaleur capable de faire fondre des métaux comme un fil de platine ou de fer. Selon l'opinion du physicien André Anders¹⁴⁰, l'origine de cette nouvelle application de la pile de Volta n'est pas clairement établie. Si le chimiste britannique Humphry Davy en est fréquemment crédité, suite à la présentation qu'il en a faite, devant la Royal Society de Londres en 1808, l'obtention d'un arc continu aurait été effectuée pour la première fois en 1802, par le physicien russe Vassili Petrov (1761-1834). Le phénomène se produit en rapprochant les extrémités de deux électrodes conductrices, taillées en carbone, reliées à une pile de Volta formée d'un grand nombre d'éléments. À cette fin, Petrov utilisera une « batterie » de 4200 cellules voltaïques ! Quant à une expérience faite par Davy en 1813, elle aurait mobilisé une batterie de

138. H. Davy, « The Bakerian Lecture, on some chemical Agencies of Electricity », *Phil. Trans.*, 1807, vol. 97, p. 1-56.

139. Pierre Bianco, *De la pile de Volta à la conquête de l'espace. Deux siècles d'électrochimie 1799-1999*, 1998, Presses universitaires de Provence.

140. André Anders, « Tracking down the origin of arc plasma Science-II. Early continuous discharges », *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2003, vol. 31, p. 1060.

2000 couples cuivre-zinc, installée dans les sous-sols de la Royal Institution à Londres. Les effets lumineux et calorifiques sont impressionnants, témoignant de l'importante quantité d'électricité mise en jeu. Comme s'il avait lui-même assisté à la démonstration, Cazin témoigne :

(...)on vit paraître une brillante étincelle, et les charbons devinrent incandescents dans la moitié de leur longueur. Davy écarta ensuite les charbons l'un de l'autre jusqu'à la distance de 11 centimètres, et la lumière persista ayant l'aspect d'une gerbe de feu, se courbant et s'agitant continuellement. Le platine, métal infusible au feu de forge, fondait dans cette gerbe, comme la cire à la flamme d'une bougie.¹⁴¹

Mais la combustion rapide du carbone des électrodes et le coût prohibitif de l'entretien d'un générateur voltaïque de cette taille ne permettra pas l'exploitation dans l'immédiat de l'arc voltaïque. La division de sa lumière éblouissante, indispensable pour assurer l'éclairage des voies publiques et l'éclairage domestique n'est pas pour demain. L'utilisation pratique de l'arc voltaïque attendra encore quelques années avant d'être en mesure d'inquiéter la lumière du gaz.

Il n'en reste pas moins qu'étincelle électrique et arc voltaïque vont rester des sujets de choix pour les savants physiciens dont les recherches mèneront à une nouvelle branche de la science : la physique des *plasmas*. Mais la physique des éclairs artificiels s'avère pour le moment mystérieuse : s'y mêlent les fluides impondérables, le calorique, la lumière et *les* électricités. Pour quelles combinaisons ? Quelles alliances ? Et comment caractériser ces deux électricités que l'on sait fabriquer désormais : la première est l'électricité statique ou en équilibre qui se développe dans les machines à frottement, à la surface des conducteurs et s'y maintient, pense-t-on, sous l'effet de la pression de l'air. Si cette électricité « de tension », selon le qualificatif que lui attribuent Antoine Becquerel (1788-1878) et son fils Edmond Becquerel (1820-1891) dans leur *Résumé de l'histoire du magnétisme et de l'électricité*¹⁴² peut vaincre, en un point du conducteur, la résistance opposée par l'air au mouvement des charges, l'étincelle éclate et le fluide électrique peut se répandre dans l'espace. L'autre électricité dite « dynamique » ou « en mouvement » est celle observée dans les circuits voltaïques ; elle peut véhiculer une « énorme » quantité d'électricité mais qui est « dépourvue de *tension* »¹⁴³. La représentation des

141. A. Cazin, [Caz76], p. 44.

142. A. Becquerel, E. Becquerel, *Résumé de l'histoire du magnétisme et de l'électricité*, Paris, Firmin Didot, 1858, p. 145.

143. A. Cazin, [Caz76], p. 48.

électricité semble s'opérer à travers ces deux termes : « quantité » et « tension » qui correspondent, selon Cazin, à deux qualités de l'étincelle : « la quantité correspond à la grosseur, à l'éclat, à la chaleur de l'étincelle et la tension à sa longueur seulement »¹⁴⁴. C'est donc par l'apparence de l'étincelle que Cazin, dans son œuvre de vulgarisation, définit les grandeurs fondamentales de la jeune science électrique. De son côté, en Angleterre, William Snow Harris (1791-1867) fait œuvre de physicien et assimile l'électricité à un fluide élastique : il propose de figurer la tension en termes de pression, fonction de l'épaisseur de la couche de charges, tandis que l'intensité exprime l'action de cette pression dans une direction donnée :

*(...) then it is clear that the term tension would be ill applied, as expressing other than elastic power : we should rather employ some such term as pressure, which would be immediately associated with altitude or thickness of the electrical stratum. We might, however, still retain the term intensity as expressive of the operation of either the whole or part of the pressure in a given direction,...*¹⁴⁵

Le concours de la physique des fluides dans la formalisation de l'électricité n'a pas réponse à tout. L'implication des agents « impondérables » suffit-elle pour comprendre la nature de l'étincelle ? Ne manque-t-il pas au phénomène des particules de matière pondérable : celles de l'air ambiant, de métal ou de carbone arrachées aux électrodes et dont l'incandescence serait la cause de cette vive lumière ? L'étincelle électrique peut elle naître et vivre dans le vide ? La réflexion induite par cette dernière question va susciter une vaste étude expérimentale, commencée dès le siècle précédent, notamment au Royaume-Uni et marquée par de belles et délicates expériences. Dans une lettre du 18 mars 1774, adressée à son ami Jan Ingenhousz (1730-1799)¹⁴⁶, Benjamin Franklin (1706-1790) évoque ainsi l'expérience que John Walsh (1726-1795) a tenté dans le vide barométrique. Les recherches du zoologiste pour établir l'identité entre la « bioélectricité » induite par la *torpille* et l'électricité générée par la bouteille de Leyde lui ont déjà valu, de la part de la Royal Society, la médaille Copley. Dans l'expérience relatée par Franklin, Walsh utilise un

144. A. Cazin, *ibid.*, p. 48.

145. W. Snow Harris, « On some Elementary Laws of Electricity. », *Phil. Trans.*, 1834, vol. 124, p. 223.

146. "From Benjamin Franklin to Jan Ingenhousz, 18 March 1774," Founders Online, National Archives, <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-21-02-0062>. [Original source : The Papers of Benjamin Franklin, vol. 21, January 1, 1774, through March 22, 1775, ed. William B. Willcox. New Haven and London : Yale University Press, 1978, p. 147-149.]

tube de Toricelli, coudé en forme de U. Les deux branches recevant le mercure sont retournées sur deux gobelets remplis aussi de mercure. Le vide est alors créé dans le coude supérieur du tube. Des fils conducteurs plongeant dans le mercure ferment le circuit avec une machine électrostatique. L'expérience ne montre aucune étincelle dans le vide barométrique. La conclusion négative est rapportée dans la lettre de Franklin : « *he finds that the Vacuum will not conduct at all, but resists the Passage of the Electric Fluid absolutely, as much as if it was Glass itself. This may lead to new Principles and new Views in the atmospheric Part of Philosophy.* »

L'enquête sur l'implication des fluides impondérables dans l'étincelle électrique ne va pas en rester là. Car, ainsi que le souligne William Morgan (1750-1833) :

*The experiments made by Mr. Walsh, F.R.S. in the double barometer tube clearly demonstrated the impermeability of the electric light through a vacuum; nor was it, I think, precipitate to conclude from them the impermeability of the electric fluid itself.*¹⁴⁷

Mais le mystère ne s'épaissit-il pas lorsque le savant gallois distingue ainsi la « lumière électrique » auquel le vide serait imperméable et le « fluide électrique » pour lequel cette imperméabilité reste à vérifier ? Cette vérification demande un vide parfait, réalisation difficile mais qui semble possible en portant le mercure à ébullition pendant plusieurs heures¹⁴⁸. La technique éprouvée, élaborée par Abraham Brook, un libraire de Norwich¹⁴⁹ ne permet malheureusement pas à Morgan d'atteindre le vide attendu, à preuve l'illumination du tube par la lumière verte caractéristique de la présence de vapeur de mercure dans le tube. La difficulté d'offrir au fluide électrique un espace vidé de toute particule matérielle empêche pendant plusieurs années la réponse à la question que pose Davy en 1822 : « *Are heat and light elements of electricity, or merely the effects of its action?* »¹⁵⁰. Le savant anglais remplace le mercure par des métaux fusibles mais moins volatils, comme un amalgame d'étain et de mercure, ou du bismuth allié à du plomb et de l'étain

147. W. Morgan, « Electrical Experiments made in order to ascertain the non conducting Power of a perfect Vacuum, & c. », *Phil. Trans.*, 1785, vol.75, p. 272-278.

148. On espère ainsi chasser l'air résiduel par la vapeur mercurielle dont la condensation par refroidissement doit permettre d'atteindre un vide plus poussé.

149. Expérimentateur habile, Brook est connu pour la publication en 1789 de l'ouvrage *Miscellaneous Experiments and Remarks on Electricity, the Air Pump, and the Barometer, with a description of an Electrometer of a new construction.*

150. H. Davy, « On the Electrical phenomena exhibited in vacuo. », *Phil. Trans.*, vol. 112, 1822, p. 64-75.

(le « métal de Rose »). Mais les efforts déployés n'apportent pas la solution technique au problème de la vapeur résiduelle dans le vide barométrique. Néanmoins, l'imposante somme d'expériences réalisées par Davy le conduit à des conclusions qu'il exprime modestement :

*It is evident from these general results that the light (and probably the heat) generated in electrical discharges depends principally on some properties or substances belonging to the ponderable matter through which it passes; but they prove likewise that space, where there is no appreciable quantity of this matter, is capable of exhibiting electrical phenomena: and, under this point of view, they are favourable to the idea of the phænomena of electricity being produced by a highly subtile fluid or fluids, of which the particles are repulsive, with respect to each other, and attractive of the particles of other matter. On such an abstruse question, however, there can be no demonstrative evidence. It may be assumed, as in the hypothesis of HOOKE, HUYGENS, and EULER, that an ethereal matter, susceptible of electrical affections, fills all space; or that the positive and negative electrical states, may increase the force of vapour from the substances in which they exist;*¹⁵¹

Lumière et chaleur de l'étincelle sont donc déterminées par le milieu qu'elle traverse. Mais les phénomènes électriques, manifestés dans un gaz raréfié ou le vide « imparfait » comme sans doute celui accessible par les appareils de Davy induisent l'idée d'un *éther* matériel dont les particules exercent entre elles des forces répulsives et attractives avec les particules des autres milieux matériels. Il devient ainsi possible d'expliquer la propagation de l'étincelle dans l'espace. La seconde hypothèse réside dans l'augmentation de la *tension de vapeur* des substances volatiles, présentes dans le tube, sous l'effet des « états électriques, positif et négatif »¹⁵².

Dans le grand mouvement scientifique de ce siècle qui va installer le règne de l'électricité, les physiciens trouvent dans la « lumière de la pile » un sujet alléchant, leur inspirant de nombreuses hypothèses. Idées audacieuses qui semblent autant rapprocher les chercheurs de la structure intime de la matière et de son interaction avec la lumière qu'au contraire les en éloigner! Les recherches sur l'électricité dans des atmosphères raréfiées sont difficiles et mobilisent des moyens importants. Les conclusions parfois hâtives conduisent à de curieux paradoxes tel celui qu'évoque Auguste de la Rive (1801-1873)

151. H. Davy, *ibid.*, p. 71-72.

152. Il serait dit aujourd'hui : « sous l'effet de la tension ou du champ électrique appliqué entre les extrémités de l'espace. ».

dans son *Traité d'électricité théorique et appliquée* : « L'air et les gaz sont d'autant moins isolants qu'ils sont plus raréfiés ; c'est ce qui fait dire que le vide est un bon conducteur de l'électricité. »¹⁵³ L'auteur s'empresse aussitôt d'ajouter que la question de la conductibilité du vide mérite de plus amples développements. Car, quand bien même un vide parfait serait-il obtenu, la matière éthérée qui est censée remplir tout l'espace ne pourrait-elle pas jouer son rôle dans la propagation des deux fluides électriques, ainsi que l'a suggéré Davy, vingt ans plus tôt ? Et par quelle expérience déterminer ce rôle ? La situation est ainsi décrite en 1841 par le citoyen de Genève dans une lettre adressée à Dumas :

Peut-être me suis-je trop étendu sur ce qui précède. Mais ce sujet me paraît toucher à une grande question, celle des rapports qui existent entre la matière pondérable et l'électricité. Il me semble en particulier destiné à éclaircir ce problème : *Y a-t-il lumière produite par l'électricité directement sans l'intervention de particules pondérables ?* Problème dont la solution est prématurée, mais devrait être plutôt négative, s'il fallait absolument se prononcer actuellement.¹⁵⁴

Le *sujet* évoqué ici par de la Rive est l'odeur prégnante qui accompagne l'étincelle électrique, caractéristique de l'ozone, identifié par Schönbein (Christian Friedrich Schönbein, 1799-1868). De la Rive conclut finalement que le volume de matériaux expérimentaux est encore trop insuffisant pour asseoir une connaissance intime du fluide électrique :

(...) plus on étudie les phénomènes que présente l'électricité, plus on arrive à reconnaître que cet agent diffère dans la forme sous laquelle il se présente à nous, de la lumière et du calorique, quoiqu'il ait avec eux des rapports intimes. Ainsi, tandis que la lumière et le calorique peuvent, à l'état rayonnant, se manifester indépendamment de la matière pondérable, l'électricité me paraît ne pouvoir jamais en être isolée. Il semblerait qu'elle est la forme sous laquelle la matière impondérable (l'éther) se présente dans son union avec la matière pondérable. Mais je me laisse aller à des considérations théoriques bien prématurées sur un sujet dans lequel l'expérience doit parler encore longtemps avant de permettre à la théorie de faire entendre sa voix d'une manière un peu assurée.¹⁵⁵

153. A. de la Rive, *Traité d'électricité théorique et appliquée*, Paris, J. -B. Baillière, 1854, tome 1, p. 5.

154. A. de la Rive, « Sur la lumière de la pile. », *CRAS*, 1841, vol. 12, p. 912-913.

155. A. de la Rive, *ibid.*, p. 914-915.

La poursuite des travaux expérimentaux que de la Rive appelle de ses vœux mobilisera en particulier plusieurs autres physiciens de la même génération que le Genevois : Peter Theophil Riess (1804-1883) en Prusse, William Snow Harris au Royaume-Uni et Antoine-Philibert Masson en France.

3.5 Antoine-Philibert Masson - Photométrie électrique

En 1844, Masson communique à l'Académie des sciences deux mémoires qu'il baptise « Études de photométrie électrique ». Quatre mémoires suivront sous le même intitulé qui, comme les deux premiers seront publiés dans les *Annales de chimie et de physique* et ces publications s'échelonnent jusqu'en décembre 1855. La sécheresse du titre masque les recherches ambitieuses de Masson.

Je me suis livré, depuis plusieurs années, à des travaux qui seront continués sans interruption sur les rapports de la lumière et de l'électricité. Je cherche à obtenir, par une connaissance intime des mouvements électriques, les bases complètes de la mécanique des fluides impondérables, et à établir un lien entre les phénomènes électriques lumineux et calorifiques.¹⁵⁶

Et Masson ajoute :

Si une seule substance peut, par des transformations de mouvement, donner naissance à de l'électricité, de la chaleur et de la lumière s'il est possible, et c'est le but que nous nous sommes proposé dans ces recherches, de ramener à une origine commune ces trois agents que tous les physiciens ont jusqu'ici considérés comme essentiellement distincts, nous devons rechercher avec soin les relations qui existent entre trois phénomènes, chaleur, lumière et électricité, simultanément produits par une même cause, et établir par des mesures précises les lois de ces rapports.¹⁵⁷

Vaste programme, donc, qui dépasse largement le cadre d'une photométrie appliquée et qui fait de la « photométrie électrique » l'auxiliaire d'une recherche fondamentale, en quête d'un principe unitaire, réunissant dans la

156. A. P. Masson, *Notice sur les travaux scientifiques de M. A. Masson*, Paris, Imprimerie de L. Martinet, 1851, p. 24.

157. A. P. Masson, « Études de photométrie électrique (Premier et deuxième Mémoire communiqués à l'Académie des Sciences dans les séances des 19 février et 5 août 1844.) », *ACP*, 1845, 3^e sér., tome 14, p. 131-132.

même description électricité, chaleur et lumière, les agents que la physique de l'époque nomme « fluides impondérables ». La méthode photométrique de Masson se démarque, comme il l'annonce en préambule du premier mémoire, des travaux de Harris¹⁵⁸ et de ceux de Riess¹⁵⁹ qui se sont surtout centrés sur les effets thermiques des courants obtenus par la décharge de « batteries »¹⁶⁰, dans des conducteurs métalliques. L'étude phénoménologique de ces décharges et de la lumière qui les accompagne ne pourra faire l'économie des mesures de son intensité lumineuse. C'est l'objet de la « photométrie électrique » dont Masson revendique clairement la primauté.

Plus occupés d'étudier la forme et la couleur de l'étincelle électrique que de mesurer son intensité, les physiciens n'ont tenté aucun travail de photométrie électrique. Partagés d'opinion sur la cause de cette vive clarté produite par l'électricité, les uns pensent qu'on doit l'attribuer à l'incandescence des particules pondérables transportées par le courant ; d'autres supposent, sans apporter aucun fait certain à l'appui de leur hypothèse, que l'électricité peut, sans la présence d'une matière pondérable, déterminer sur nos organes une impression lumineuse par un mouvement communiqué au fluide lumineux.¹⁶¹

Masson n'est pas un inconnu de l'Académie des sciences. Dans l'hommage qu'il rend au savant bourguignon, Louis Joyignot relate les grandes étapes de sa vie et de sa carrière¹⁶². Antoine-Philibert Masson est né le 22 août 1806 à Auxonne, dans le département de la Côte d'or où son père, Pierre Masson, était pharmacien. En 1824, Antoine-Philibert suit son père à Nancy où ce dernier vient d'être nommé professeur à l'École royale forestière. C'est dans cette ville que le jeune homme achève ses études secondaires, couronnées par l'obtention du baccalauréat ès lettres. En 1828, il part, de nouveau avec son père, pour Paris où il poursuit des études scientifiques. Ses études à l'École préparatoire de Paris, qui deviendra l'École normale supérieure, et à la Faculté des sciences de Paris lui permettent de suivre les enseignements

158. W. S. Harris, « On some Elementary Laws of Electricity », *Phil. Trans.*, 1834, vol. 124., p. 213-245.

159. P. Riess, « Ueber einige Wirkungen der Reibungselectricität, im Verhältnisse zu ihrer Anhäufung ; », *Annalen der Physik und der Chemie*, 1837, vol. 40, p. 321-355.

160. Le terme désigne ici un ensemble de bouteilles de Leyde permettant de stocker d'importantes quantités d'électricité.

161. A. P. Masson, [Mas45], p. 132-133.

162. Louis Joyignot, « Un grand savant bourguignon du XIX^e siècle : Antoine Masson », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, 1948, tome 1, n° 4, p. 337-350.

d'Eugène Pécelet, l'un des fondateurs de l'École centrale des arts et manufactures, de Pierre Louis Dulong et de Claude Pouillet. Après son succès au concours de l'agrégation des sciences en octobre 1830, il est nommé en 1831 au Collège royal de Caen. Outre son activité d'enseignement, Masson va mener une intense activité de recherche¹⁶³. Le *catalogue des thèses de sciences* d'Albert Maire (1856-1931)¹⁶⁴ fait état de deux thèses soutenues en 1838 par Masson, à la Faculté des sciences de Paris. La première est publiée sous l'intitulé *Théorie physique et mathématique des phénomènes électro-dynamiques et du magnétisme* (Paris, Crochard et Cie) ; le second travail est résumé dans le *Mémoire sur l'action exercée par le chlorure de zinc sur l'alcool*¹⁶⁵. Les recherches sur l'électro-dynamique et le magnétisme ont été remarquées et saluées par Ampère lui-même, dans une lettre datée du 21 mars 1836 :

(...) ce n'est que de vous, Monsieur, que je puis espérer de voir généralement adoptés les résultats auxquels je suis parvenu sans leur donner la rigueur nécessaire qu'ils ne peuvent recevoir que de votre travail. J'attends donc avec autant d'impatience que de reconnaissance la suite que vous m'annoncez et surtout l'impression de votre thèse qui sera un jour l'ouvrage où l'on étudiera de préférence cette branche de la physique.¹⁶⁶

Au commencement des années 1840, Masson apparaît donc comme l'un des meilleurs spécialistes français de l'électro-dynamique. De nouveaux phénomènes comme le « magnétisme de rotation » découvert par Arago et présenté devant l'Académie des sciences en 1825¹⁶⁷ et « l'induction de courants électriques », annoncé en 1831, devant la Royal Society, par Michael Faraday (1791-1867)¹⁶⁸, vont soumettre Masson à un important travail de recherche. Fort de son expérience, il s'empare du sujet des « courants induits » et « auto-induits » dans les circuits¹⁶⁹. Il constate que dans un circuit ali-

163. L'annexe E présente les états de service du professeur.

164. A. Maire, *Catalogue des thèses de sciences soutenues en France de 1810 à 1890 inclusivement*, Paris, H. Welter, 1892, p. 14-15.

165. A. P. Masson, « De l'Action exercée par le Chlorure de Zinc sur l'Acool (sic) et des Produits qui en résultent ; », *ACP*, Paris, Crochard, 1838, tome 69, p. 225-258.

166. Le texte de la lettre d'Ampère est celui reproduit par Masson lui-même dans [Mas51b], p. 2.

167. « Analyse des Séances de l'Académie royale des Sciences », *ACP*, 1825, tome 28, p. 325-326. et F. Arago, *Œuvres*, tome 4, p. 425-448.

168. M. Faraday, « V. Experimental Researches in Electricity. », *Phil. Trans.*, 1832, vol. 122, p. 125-162 et « VI. The Bakerian Lecture.— Experimental Researches in Electricity.— Second Series. », *Phil. Trans.*, 1832, vol. 122, p. 163-194.

169. A. P. Masson, « De l'Induction d'un Courant sur lui-même », *ACP*, 1837, sér. 2, tome 66, p. 5-36.

menté par plusieurs éléments « voltaïques » et rendu fortement inductif en y plaçant une *hélice* comportant un grand nombre de tours de fil de cuivre ou un électro-aimant, l'ouverture du circuit produit une vive étincelle entre les points de rupture.

Dans un courant voltaïque, on place un électro-aimant garni d'un fil de cuivre très long, et deux cylindres de laiton de 8 pouces de long sur 1 pouce de diamètre (ceux par exemple qui servent dans l'appareil de Pixii). Après avoir trempé les mains dans de l'eau acidulée, on saisit ces tubes métalliques, et en les rapprochant, ou les éloignant successivement, ou interrompt ou on ferme le circuit ; on éprouve alors de très fortes commotions, toutes les fois que le courant est interrompu : en l'établissant, au contraire, l'effet est nul.¹⁷⁰

Les expériences de Masson confirment les résultats de Faraday et de Joseph Henry (1797-1878) et révèlent des lois expérimentales des phénomènes d'induction électromagnétique : l'augmentation de la longueur du fil et donc, en langage moderne, du « nombre de spires » de l'hélice augmente l'intensité de l'étincelle et des commotions. Masson vérifie que les modifications du courant ne se manifestent qu'à la fermeture et à l'ouverture du circuit : les phénomènes ne s'observent qu'en régime dynamique. Il montre également que l'intensité du courant est augmentée de celle du courant induit ou « extra-courant de rupture » à l'ouverture du circuit, tandis qu'elle en est diminuée à la fermeture. Il met aussi en parallèle les effets des bobinages inductifs qu'il appelle « cylindres électro-dynamiques » avec ceux des éléments capacitifs (bouteilles de Leyde)¹⁷¹ : « des cylindres électro-dynamiques peuvent être considérés comme jouant à l'égard des piles le même rôle que les bouteilles de Leyde à l'égard des machines électriques. »¹⁷²

Un second mémoire sur l'Induction, coécrit avec le constructeur d'instruments Louis Bréguet (Louis François Clément Bréguet, 1804-1883) est publié en 1842 dans les Annales de chimie et de physique. Masson et Bréguet peuvent rendre compte de leurs expériences mettant en évidence les hautes tensions¹⁷³ obtenues à l'ouverture et à la fermeture d'un circuit. La visée de ce programme expérimental est la résolution d'une question fondamentale :

170. A. P. Masson, *ibid.*, p. 5-6.

171. Rapprochement qui fait référence à l'idée de stockage de l'énergie électrostatique $\frac{1}{2}CV^2$ (C capacité, V tension) dans un condensateur et de l'énergie électrodynamique $\frac{1}{2}Li^2$ (L inductance, i intensité) dans la bobine de fil.

172. A. P. Masson, *ibid.*, p. 12.

173. Il s'agit en langage moderne des « forces électromotrices induites ».

vérifier le bien-fondé de l'hypothèse particulière, avancée par Ampère pour expliquer les interactions entre aimants et courants voltaïques. Dans l'idée de Masson, la physique pourra ainsi rassembler sous un même principe des phénomènes aussi divers que le magnétisme, l'électricité dynamique (c'est à dire les courants électriques) créée par les sources voltaïques et l'électricité statique (c'est à dire les charges électriques fixes) générée par les machines à frottement. Son programme se résume à ces mots :

Cependant il règne encore du doute sur l'existence des courants particuliers, et sur l'état de l'électricité dans les aimants. Rechercher les rapports qui unissent les phénomènes électro-dynamiques et magnétiques aux actions électriques simples exercées par les corps frottés, tel est le but que nous nous sommes proposé en commençant par l'étude des rapports qui existent entre les courants et l'électrostatique.¹⁷⁴

et, comme il le dit plus loin, il s'agit de prouver « l'identité des phénomènes électriques quelle qu'en soit la cause »¹⁷⁵. Après avoir constaté que l'électricité statique, telle que celle stockée dans des bouteilles de Leyde, faisant office de condensateurs, peut être convertie en électricité dynamique (courants) dans les milieux conducteurs, il reste à démontrer le phénomène inverse : la conversion du courant en électricité statique qu'il doit être possible de collecter dans les armatures d'un condensateur plan. À cette fin, Masson et Bréguet utilisent les « extra-courants » produits avec des piles et des bobinages superposés, comportant un grand nombre de spires¹⁷⁶. Un contacteur que l'on peut mettre en rotation à l'aide d'une manivelle permet d'interrompre et de rétablir le courant à volonté. Le système fabriqué par Bréguet et appelé « rhéotrope »¹⁷⁷ est ainsi conçu que l'on obtient toujours dans le même sens les courants alternatifs d'induction¹⁷⁸. Ces équipements permettent à Masson d'obtenir des étincelles de fortes intensités, entre les plateaux d'un condensateur placé dans le circuit du courant induit et d'obtenir des charges très importantes sur ces armatures. Masson et Bréguet, qui viennent ainsi d'inventer la *bobine d'induction*, apportent également une preuve expérimen-

174. A. P. Masson, L. Bréguet, « Mémoire sur l'Induction », *ACP*, 1842, sér. 3, tome 4, p. 129.

175. A. P. Masson, L. Bréguet, *ibid.*, p. 130.

176. Masson fait état de 650 m de fil de cuivre isolé avec du coton.

177. Du grec *rheîn*, « couler, s'écouler ».

178. Une description détaillée du dispositif que Jamin appelle « rhéotome » est fournie par ce dernier dans son *Petit traité de physique à l'usage des aspirants aux baccalauréats et des candidats aux écoles du gouvernement*, Paris, Gauthier-Villars, 1870, p. 419-423.

tale à l'appui de l'unicité des différentes électricités : l'électricité statique et l'électricité dynamique des courants induits. Masson conclut :

Un courant d'induction magnétique peut produire des étincelles à distance dans l'air, et charger fortement un condensateur ; par conséquent, un courant d'induction peut être entièrement transformé en électricité statique.¹⁷⁹

C'est ensuite à la question de la lumière électrique que l'on sait maintenant produire avec la bouteille de Leyde, la pile et la bobine à induction que va se consacrer Masson. La troisième partie du mémoire de 1842 traite « De la lumière électrique obtenue avec des courants ». Masson y expose sa recherche des conditions pour produire la lumière électrique dans le vide. Il s'agit avant tout de vérifier la validité d'une hypothèse couramment avancée sur la conductibilité du vide et que le Normand d'adoption rappelle dans une note présentée en juillet 1838, devant l'Académie des sciences :

On admet généralement en physique que l'électricité statique est retenue par l'air à la surface des corps conducteurs isolés, et qu'elle se répand instantanément, sous forme de courants dans le vide, qu'on est alors conduit à considérer comme formant fonction de conducteur.¹⁸⁰

Ses premières expériences utilisent le vide barométrique dans un tube de Toricelli, muni à son sommet d'un fil de platine scellé au verre. Malheureusement l'amorçage d'un arc continu dans ces conditions est impossible. Lorsque le fil de platine et le mercure sont amenés au contact, le courant de forte intensité porte le fil de platine à l'incandescence, avec pour conséquence la vaporisation du mercure, causée par la chaleur dégagée ou la rupture du baromètre. Autant de difficultés qui conduisent Masson à se tourner vers un autre instrument : « l'œuf électrique ». L'appareil est un « vaisseau » en verre, muni à ses extrémités d'électrodes sphériques en laiton. Un embout permet de le relier à une pompe « à double épuisement » afin d'y faire le vide. Une fois celui-ci réalisé dans l'enceinte de verre, Masson parvient à générer de puissantes étincelles, en plaçant l'œuf dans l'extra-courant de sa bobine de 1300 m de fil de cuivre, reliée à une pile de forte capacité, formée de huit éléments¹⁸¹. En actionnant le rhéotrope, on fabrique une succession de vives étincelles que l'on peut tirer jusqu'à une distance de deux centimètres entre les deux électrodes de laiton.

179. A. P. Masson, L. Bréguet, [MB42], p. 131.

180. A. P. Masson, « Sur le fluide électrique à l'état de diffusion dans le vide. », *CRAS*, 1838, tome 7, n° 14, p. 671.

181. Cazin prétend qu'il s'agit d'éléments selon le système Daniell.

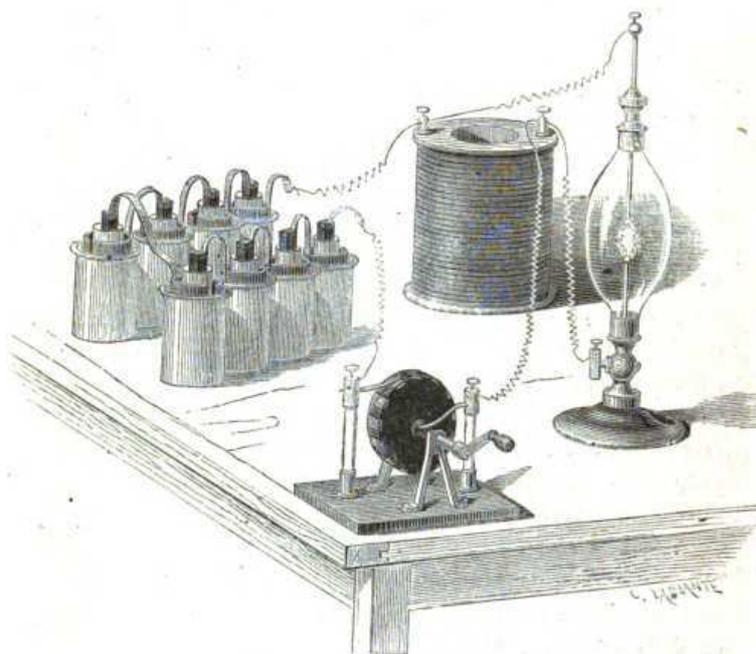


Fig. 7. — Étincelle par l'extracourant.

fig. 3.9 – Gravure montrant le montage de Masson avec l'œuf électrique, placé dans l'*extra-courant*. Tiré de A. Cazin, *L'étincelle électrique*, Librairie Hachette et Cie, Paris, 1876, p. 50.

Le nouveau dispositif offre à Masson un arc continu qu'il peut, à loisir, décrire dans tous ses détails. Il observe ainsi l'incidence de la nature des électrodes, en employant différents métaux : or, argent, platine, cuivre, zinc, laiton, fer, acier, et aussi des pointes de charbon de cornues. Dans tous les cas, dit Masson, les étincelles sont brillantes et bordées de bleu. Il soumet également la lumière électrique à une analyse spectrale qui révèle la présence de toutes les couleurs du spectre. Il vérifie enfin l'absence de polarisation avec le polariscope de Félix Savart (1791-1841).

À cette étude détaillée, mais qui reste qualitative, de l'étincelle électrique en atmosphère raréfiée, succède une importante campagne de mesures sur la lumière électrique dont les résultats seront publiés dans les mémoires intitulés « Photométrie électrique ». Masson insiste sur la nécessité d'inventer de nouveaux instruments, puisque les photomètres existants ne peuvent se livrer à des comparaisons que sur des lumières fixes. Or il s'agit maintenant de mesurer des éclaircissements dont il évalue la durée moyenne à un millionième

de seconde¹⁸². Masson souhaite un photomètre universel, adaptable tant aux lumières colorées qu'aux lumières brèves, instrument qu'il va inventer : « (...) la détermination des rapports qui lient les variations de la lumière électrique aux variations de sa cause exige l'emploi d'appareils photométriques exacts et applicables à toutes les lumières colorées ou non colorées, permanentes ou instantanées. »¹⁸³

Comme l'intensité de l'étincelle électrique ne pourra se mesurer que par comparaison à une lumière de référence, la première tâche que s'assigne Masson est l'évaluation de la sensibilité de l'œil, par une méthode résolument différente de celle inventée par Bouguer. Son instrument est un disque de papier blanc de quelques centimètres de diamètre, sur lequel est délimité un secteur très étroit, dont la surface représente une fraction donnée de la surface totale du disque, par exemple $1/60$, comme sur le disque N°2 (Fig. 3.10). Ce secteur est noirci sur une petite longueur notée mn . Ce disque, collé ensuite sur un disque de cuivre de même diamètre, muni d'un axe en son centre, peut être mis en rotation rapide (environ 200 à 300 tr/s) grâce à un mouvement d'horlogerie.

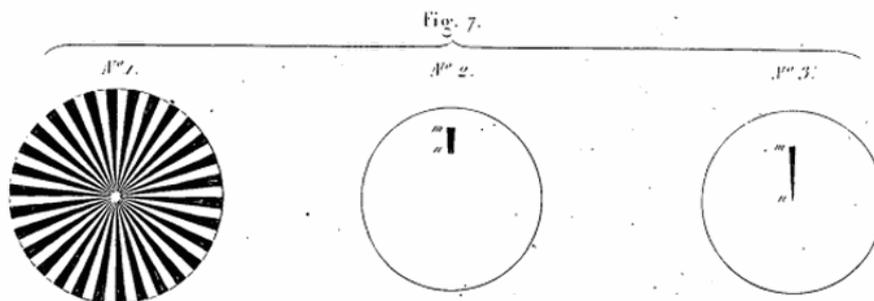


fig. 3.10 – Les disques de Masson, tiré de A.P. Masson, « Étude de photométrie électrique (premier et deuxième mémoire) », *ACP*, Paris, 1845, sér. 3, tome 14, Pl. III.

Si par exemple le disque N°2 précédent, convenablement éclairé, est mis en mouvement, l'observateur doit voir sur le fond blanc du papier, une couronne dont l'éclairement est diminué de $1/60^e$ par rapport à celui du fond¹⁸⁴. S'il en est bien ainsi, la « sensibilité de l'œil » est de un soixantième de l'éclairement moyen. L'expérience peut facilement être renouvelée en modifiant l'angle du secteur : les valeurs testées par Masson vont ainsi de $1/50$ ($7,2^\circ$) à $1/120$

182. A. P. Masson, « Étude de photométrie électrique; par M.A. Masson. Premier mémoire. (Extrait par l'auteur). », *CRAS*, 1844, vol. 18, p. 290.

183. A. P. Masson, [Mas45], p. 133.

184. La couronne apparaît grise sur un fond blanc

(3°). L'essai peut également être reproduit sur différents observateurs. Masson ne précise malheureusement pas le nombre de sujets qui se sont prêtés à cette expérience qui lui permet cependant de distinguer trois groupes d'observateurs : les vues « faibles » affichant une sensibilité comprise entre 1/50 et 1/70 ; les vues « ordinaires » affichant une sensibilité comprise entre 1/80 et 1/100 ; enfin les bonnes vues entre 1/100 et 1/120. Masson ajoute qu'il a rencontré « deux personnes apercevant fort distinctement la couronne produite sur un disque donnant le rapport $\frac{1}{120}$ »¹⁸⁵. L'étude révèle en outre que la sensibilité ne dépend pas de l'intensité de l'éclairement « quand il était suffisant pour qu'on put facilement lire dans un in-octavo. »¹⁸⁶ En interposant des verres colorés sur le trajet de la lumière du Soleil ou d'une lampe Carcel, Masson constate que la limite de sensibilité est aussi indépendante de la couleur. Masson va également vérifier que le phénomène dit aujourd'hui de Fechner-Benham — la perception de couleurs dites « subjectives » par suite de la mise en rotation d'un motif incolore — n'est pas susceptible d'influencer les observateurs car ces couleurs n'apparaissent qu'à une faible vitesse (≤ 100 tr/s) de rotation du disque, très inférieure à celle de son photomètre. Le but de ces expériences nombreuses, précise encore le physicien, n'est pas tant d'obtenir une importante masse de données concernant la physiologie de la vision, que de déterminer les effets physiologiques qui devront être pris en compte dans son étude photométrique de l'étincelle électrique.

Nous n'avons examiné, dans ce travail, que les effets physiologiques qu'il nous importait de connaître pour la suite de nos recherches, laissant aux médecins le soin d'appliquer notre instrument dans l'étude des affections de la vue ou pour les progrès de la physiologie.¹⁸⁷

Il reste maintenant à vérifier si la sensibilité reste identique lors de la comparaison d'une lumière fixe avec une lumière brève, telle que celle de l'étincelle électrique. Dans son traité de physique, Pierre Adolphe Daguin (1814-1884) fournit un dessin simplifié du photomètre électrique imaginé par Masson (fig. 3.11)¹⁸⁸. L'instrument comprend, comme dans les expériences précédentes, un disque de papier mis en rotation rapide. Seul le motif en mouvement est modifié : le disque est divisé en secteurs égaux, alternativement

185. A. P. Masson, *ibid.*, p. 151.

186. A. P. Masson, *ibid.*, p. 151.

187. A. P. Masson, *ibid.*, p. 154.

188. Cazin livre une représentation équivalente dans *L'étincelle électrique* (p. 134 de l'édition de 1876). Pour une vision complète de l'instrument, voir A. P. Masson, [Mas45], Pl. II.

blancs et noirs, comme sur le disque $N^{\circ}1$ de la figure 3.10. Pendant l'expérience, le disque en rotation doit recevoir simultanément deux lumières : 1°/ la lumière fixe d'une lampe Carcel L enfermée dans un boîtier en bois noirci, mobile sur un rail, de façon à pouvoir être rapprochée ou éloignée à volonté du photomètre ; 2°/ la lumière brève de l'étincelle qui jaillit entre deux boules isolées, séparées l'une de l'autre d'une distance d réglable à l'aide d'un micromètre. Cet ensemble, qui sera appelé ici « éclateur », est monté sur un chariot posé sur un second rail, pouvant se déplacer à distance voulue du photomètre. L'étincelle est obtenue par la décharge d'un condensateur plan (non représenté sur le dessin de Daguin) formé d'une plaque de verre carrée dont les deux faces étamées forment les armatures et sont reliées à une machine électrique à frottement. La liaison électrique entre le condensateur et les boules de l'éclateur est assurée par des fils conducteurs plongeant dans deux rigoles remplies de mercure, représentées par mm' et nn' . L'observateur observe les secteurs du disque à travers un tube t noirci intérieurement et extérieurement et perpendiculaire au plan du disque. Ce tube, la flamme de la lampe Carcel, l'éclateur sont rigoureusement placés dans le même plan.

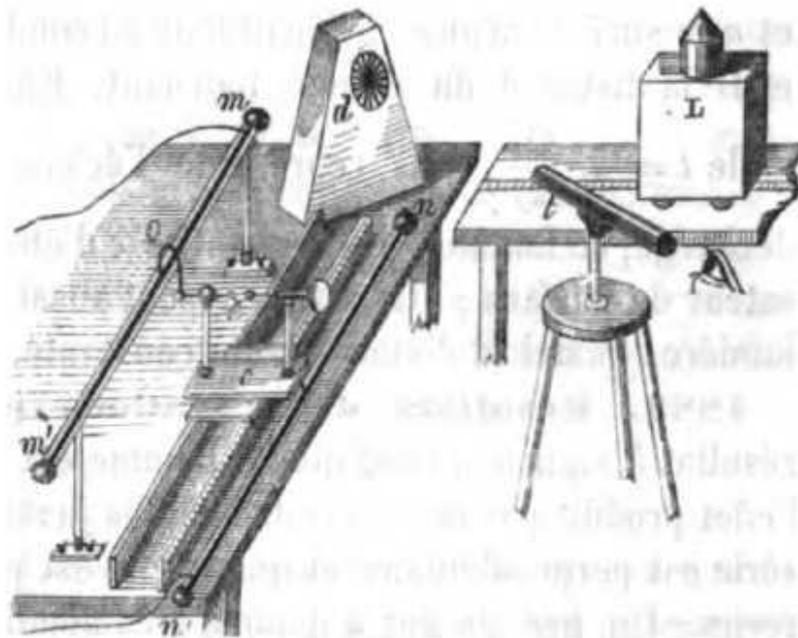


fig. 3.11 – Le photomètre électrique de Masson, tiré de P. A. Daguin, *Traité élémentaire de physique théorique et expérimentale*, tome 4, 2^e édition, Toulouse, E. Privat, Paris, Dezobry Tandou, 1862, p. 33.

La lampe Carcel éclairant le disque, ce dernier est mis en rotation. Si la vi-

tesse est suffisante, en raison de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, la surface du disque apparaît d'un gris clair uniforme. Si le disque est ensuite éclairé par la lumière brève de l'étincelle, l'observateur peut distinguer nettement les secteurs tracés sur le disque comme s'ils étaient fixes. En effet, pendant la durée très courte de l'éclair, le déplacement des secteurs du disque n'est pas sensible et leur position semble fixe. Une deuxième étincelle montrera une nouvelle position des secteurs¹⁸⁹. Qu'observe-t-on enfin quand le disque est éclairé simultanément par la lumière constante de la Carcel et par les étincelles successives, générées par la machine électrique et le condensateur ? Masson explique :

Si le disque éclairé par une lumière permanente est subitement illuminé par une lumière instantanée, une étincelle électrique par exemple, on verra, pour une intensité convenable de cette dernière, apparaître les secteurs. Si l'on affaiblit successivement la lumière instantanée, il arrivera une époque où les secteurs disparaîtront, et le disque paraîtra éclairé d'une teinte uniforme. Dans ce cas, la lumière instantanée est une fraction de la lumière permanente, variable avec l'œil de l'opérateur, mais invariable pour un même œil, les circonstances de vision restant les mêmes. En effet, à cause de la persistance de la sensation, la place qu'occupe un secteur noir, ne réfléchissant pas la lumière de l'étincelle, a conservé l'éclairement primitif du fond ; celle qu'occupe un secteur blanc renvoie à l'œil autant de lumière que la première, plus la lumière due à l'étincelle. Quand l'intensité de cette dernière représentera la limite de sensibilité de l'œil de l'observateur, le disque paraîtra uniformément éclairé.¹⁹⁰

L'affaiblissement de la lumière instantanée est effectué en reculant l'éclateur sur son rail. La disparition des secteurs est très sensible et le pointé de la distance de l'étincelle au photomètre en est d'autant facilité. Il devient alors possible de comparer les intensités de deux étincelles obtenues pour deux distances d'explosion différentes, en les confrontant successivement à la lumière de la Carcel. Le rapport des carrés des distances au disque, mesurées dans les deux cas, donne le rapport des intensités des deux étincelles. Mais Masson est conscient que la généralisation de la loi des distances aux lumières brèves n'a pas encore été établie : « Les intensités des étincelles électriques étant déterminées par la distance du chariot au photomètre, il devenait nécessaire

189. Ce phénomène est utilisé en stroboscopie, pour observer les états instantanés d'un système en mouvement rapide.

190. A. P. Masson, [Mas45], p. 137-138.

de s'assurer si l'on pouvait appliquer aux lumières instantanées la loi des distances relatives aux lumières permanentes. »¹⁹¹

Après avoir réalisé un premier pointé obtenu pour une distance au photomètre, notée Z_1 pour la Carcel et Y_1 pour l'étincelle, la distance Z est augmentée selon une progression arithmétique de raison R . Les nouveaux pointés montrent alors que les valeurs de Y suivent aussi sensiblement une progression arithmétique de raison r et l'on remarque que le rapport $\frac{R}{r}$ est constant. En appelant m^2 et n^2 les intensités de la lampe et de l'étincelle « à

Z.	Y.		Moyenne.	Différence.	Z Y	R r
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
540	406	408	407	"	1,32	1,20
640	491	487	489	82	1,30	"
740	571	567	569	80	1,30	"
840	648	648	648	79	1,29	"
940	740	734	737	89	1,28	"
1040	826	827	826	89	1,25	"
			Moyenne.....	83	1,29	

fig. 3.12 – A. P. Masson, « Étude de photométrie électrique », ACP, Paris, 1845, sér. 3, tome 14, p. 157.

l'unité de distance du photomètre », Masson écrit¹⁹² que si la loi des distances est vraie, pour un nouveau pointé correspondant aux distances $Z_1 + R$ et $Y_1 + r$ alors¹⁹³ :

$$\frac{m^2}{Z_1} : \frac{n^2}{Y_1} :: \frac{m^2}{(Z_1 + R)^2} : \frac{n^2}{(Y_1 + r)^2},$$

La proportion écrite par Masson conduit en notation actuelle à l'égalité des rapports :

$$\frac{Z_1}{Y_1} = \frac{Z_1 + R}{Y_1 + r} = \frac{R}{r}.$$

191. A. P. Masson, [Mas45], p. 156.

192. A. P. Masson, *ibid.*, p. 157.

193. Remarquer la coquille : il faut lire Z_1^2 au dénominateur de la première fraction.

Pour deux pointés à la limite de visibilité des secteurs correspondant à des distances différentes, le rapport $\frac{R}{r}$ est constant, ce qui est vérifié par l'expérience et les résultats du tableau de la figure 3.12. Pour terminer la démonstration, Masson ajoute :

Il résulte encore des formules précédentes que, si l'on choisit l'étincelle de manière qu'à la limite les deux lumières soient à la même distance du photomètre on cessera toujours de voir les secteurs quand les lumières seront également éloignées du photomètre...¹⁹⁴

conséquence qui se vérifie aussi par l'expérience. La confirmation de la loi des distances pour les lumières instantanées rend ainsi la méthode de Masson applicable à la mesure de la lumière électrique.

Équipé de son photomètre, Masson se montre un expérimentateur minutieux et scrupuleux. Si la question d'un principe unique, dont lumière, électricité, fluide magnétique seraient les manifestations, guide ses recherches, il veut avant tout déduire les lois phénoménologiques régissant l'étincelle électrique d'une somme suffisante de mesures. Cette collecte de données se poursuivra plusieurs années durant, jusqu'à la publication de son sixième mémoire en 1855. Le professeur agrégé qui enseigne désormais (depuis 1841) à l'École centrale des arts et manufactures et à la Faculté des sciences de Paris est rompu aux expériences de démonstration. Il a l'habitude de manier les équipements de ses leçons qui sont les mêmes, comme c'est souvent le cas à l'époque, que ceux utilisés pour ses recherches. Il sait en obtenir « un service régulier et constant ». Ainsi des machines électrostatiques, dont il métallise de ses propres mains les coussins, pour en tirer des étincelles vigoureuses et régulières, comme des condensateurs (qu'il fabrique aussi lui-même). Ces précautions prises, Masson va réaliser sur l'étincelle électrique un nombre impressionnant d'expériences qu'il qualifiera à plusieurs reprises de pénibles, tant elles demandent de la patience et peuvent aussi occasionner à l'opérateur des commotions douloureuses, susceptibles de perturber les mesures :

Enfin malgré l'isolement obtenu par le cercle de verre verni, l'observateur reçoit toujours par influence des commotions ou actions électriques qui agissent sur son système nerveux soit en modifiant la sensibilité de son organe, soit en agissant par surprise et lui faisant cligner l'œil. Ces actions, par influence, doivent en outre causer des pertes dans la décharge.¹⁹⁵

194. A. P. Masson, *ibid.*, p. 158-159.

195. A. P. Masson, [Mas45], p. 163.

Le premier ensemble d'expériences est regroupé dans son mémoire sous le titre : « Mesure de l'intensité de la lumière électrique produite par la décharge d'un condensateur. » En utilisant un éclateur formé de boules de petites tailles, Masson était déjà parvenu au résultat que « l'intensité de la lumière d'une étincelle électrique, produite par la décharge d'un condensateur dans des conditions constantes, était invariable, et cela quel que soit le temps que l'on mette à charger le cadre [le condensateur]. »¹⁹⁶ De là son idée de « comparer toutes les lumières à une étincelle électrique, et à chercher, dans les lois de la production de la lumière électrique, les bases d'une unité photométrique invariable. »¹⁹⁷ Il s'agit maintenant, au contraire, de faire varier les conditions de production de l'étincelle, en commençant par ce que Masson appelle la « distance d'explosion », c'est à dire la distance des boules métalliques entre lesquelles jaillissent les étincelles. Le tableau XV (figure 3.13) révèle les conditions des mesures : $Z = 540$ mm est la distance de la lampe Carcel au photomètre ; la surface du cadre est celle de chaque armature du condensateur, soit d'un carré de 20 cm de côté ; X est la distance d'explosion réglable au demi-millimètre près avec un micromètre conçu par le constructeur Soleil ; Y enfin est la distance de l'éclateur au photomètre.

TABLEAU N° XV.
 $Z = 540^{\text{mm}}$. — Surface du cadre, 40 000 millimètres carrés.

X.	Y.		Moyenne.	Différence.	$\frac{Y}{X}$	$\frac{R}{r}$
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
3,5	407	409	408	"	116,6	118
4,5	526	527	526	118	117,0	"
5,5	637	652	644	118	117,0	"
6,5	764	764	764	120	117,0	"
7,5	881	884	882	118	117,0	"
8,5	999	1003	1001	119	117,0	"
			Moyenne.	118	117,0	

fig. 3.13 – A. P. Masson, « Étude de photométrie électrique », ACP, Paris, 1845, sér. 3, tome 14, p. 166.

Masson peut constater la stricte proportionnalité entre les deux variables X et Y . Comme l'intensité de l'étincelle varie comme Y^2 , il peut énoncer une

196. A. P. Masson, *ibid.*, p. 148.

197. A. P. Masson, *ibid.*, p. 148.

« PREMIÈRE LOI.— Les intensités de l'étincelle électrique sont proportionnelles aux carrés des distances d'explosion ?(sic) » à laquelle succèdent deux autres lois : « DEUXIÈME LOI.— Les intensités de l'étincelle électrique sont proportionnelles aux surfaces des condensateurs. » et « TROISIÈME LOI.— Les intensités de l'étincelle électrique sont en raison inverse des épaisseurs [distance entre les armatures] des condensateurs. »¹⁹⁸ Masson conclut enfin en étudiant l'influence de la nature des pôles sur l'intensité de l'étincelle. Les « pôles » sont les boules de métal entre lesquelles se forme cette dernière. Masson utilise des boules de 4 mm de diamètre, façonnées dans les métaux suivants : cuivre, fer, laiton, zinc, étain, plomb. Il note des différences notables entre deux classes de métaux : le cuivre, le laiton, le fer forment la classe I ; le zinc, l'étain, le plomb subissant des altérations plus importantes sont, eux, placés dans la classe II. Encore une fois, il s'agit d'expliquer la conduction et l'émission de lumière par un transport de matière extraite des électrodes, sous « des effets d'arrachement qui dépendent de la ténacité de ces métaux, et non de leur fusibilité. »¹⁹⁹ Si Masson est loin d'une interprétation des phénomènes, il ajoute néanmoins une conclusion qui pourrait préfigurer une explication moderne : l'ionisation du substrat gazeux et une variation rapide de sa conductibilité par les chocs avec les particules arrachées à la matière des électrodes.

Les variations de l'intensité de la lumière doivent être attribuées non pas à des matières en ignition, mais à des variations de conductibilité dans le circuit gazeux, modifié par la substance métallique entraînée.²⁰⁰

Le travail de Masson ne s'arrête pas là. Guidé par l'idée d'offrir, par l'étincelle électrique, une unité de lumière à la photométrie, le savant bourguignon va passer au peigne fin tous les paramètres susceptibles d'influencer l'intensité de la lumière électrique, comme la conductibilité des boules et l'état de leur surface²⁰¹ mais aussi la conductibilité du circuit parcouru par la décharge²⁰². D'autres études viennent compléter l'œuvre de Masson, en particulier sur la « résistance des gaz à la transmission électrique »²⁰³, « résistance » dépendant de la nature du gaz et de sa pression, mais aussi sur la « résistance

198. A. P. Masson, *ibid.*, p. 167-174.

199. A. P. Masson, *ibid.*, p. 178.

200. A. P. Masson, *ibid.*, p. 178.

201. Plusieurs matériaux seront utilisés : le laiton étamé, le laiton « noirci à la chandelle », le laiton amalgamé, le « charbon des piles de Bunsen ».

202. A. P. Masson, « Étude de photométrie électrique ; troisième mémoire. », *ACP*, 1850, sér. 3, vol. 30, p. 5-55.

203. A. P. Masson, *ibid.*, p. 38.

des liquides à l'explosion électrique »²⁰⁴. Ces nouvelles études demandant des expériences et des instruments encore plus délicats conduisent pourtant à des nombres incertains.

L'Étude exhaustive menée par Masson sur l'étincelle électrique s'achève par l'analyse spectrale de cette dernière qui est le sujet de ses quatrième et cinquième mémoires²⁰⁵. Ces nouvelles expériences seront pour lui l'occasion d'utiliser, à la place des machines électrostatiques, la bobine d'induction qu'il a conçue avec Bréguet et la bobine construite par Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877), inspirée des propres travaux de Masson. Ces instruments lui permettent de charger des condensateurs dont il peut tirer de vigoureuses étincelles. Pour son analyse, Masson utilise un *goniomètre* de Babinet, dont le collimateur est muni d'une fente étroite pour limiter la lumière si nécessaire. Le spectre est obtenu par un prisme de *flint-glass* signé Guinand (Pierre-Louis Guinand, 1748-1824 ou ses fils Henri, 1771-1852 et Aimé, 1780-1857). L'instrument, muni de sa lunette pour l'observation est de très bonne facture. Masson peut ainsi réaliser le catalogage des raies présentées par les spectres de plusieurs éléments : charbon, cadmium, antimoine, bismuth, plomb, étain, fer, zinc, platine, argent, or, etc. Cette étude consignée dans un mémoire se verra récompensée et publiée par la Société royale de Harlem en 1854²⁰⁶. Masson, comme l'a fait en Grande-Bretagne Charles Wheatstone (1802-1875) inaugure ainsi en France, par ce travail, une nouvelle science expérimentale : la spectroscopie, qui se montrera déterminante pour la découverte de nouveaux éléments et la connaissance intime de la matière.

La littérature consacrée à la photométrie associe le nom de Masson à ses seules évaluations de la sensibilité aux différences, dont la première estimation avait été fournie par Bouguer. Il n'a peut-être pas été suffisamment mentionné que Masson s'est appliqué à explorer, au sein de la discipline, un nouveau champ expérimental : la photométrie des régimes dynamiques. Car les lois de la première photométrie, celle de Bouguer et de Lambert, s'appliquent à des lumières fixes, constantes ou lentement variables dans le temps (il s'agissait alors de flammes). On parle en physique de « régime statique ». Or le photomètre de Masson soumet l'œil de l'observateur à des stimuli variables rapidement dans le temps. Des phénomènes physiologiques spécifiques induisent des sensations nouvelles : la fusion des images rétiniennes, qui se succèdent à vitesse élevée, provoque ainsi la sensation d'un gris uniforme.

204. A. P. Masson, *ibid.*, p. 49.

205. A. P. Masson, « Étude de photométrie électrique ; quatrième et cinquième mémoires. », *ACP*, 1851, sér.3, vol. 31, p. 295-326.

206. A. P. Masson, *Mémoire sur l'étincelle électrique*, ouvrage couronnée par la Société hollandaise des sciences, Harlem, Les héritiers Loosjes, 1854.

L'œuvre de Masson peut être considérée comme particulièrement novatrice, quand il s'attache à créer une nouvelle photométrie dite « électrique » ; finalement à passer d'une photométrie *restreinte* à une photométrie *générale*, en réalisant l'extension des lois de la première photométrie aux lumières brèves, en déterminant ensuite par une méthode dynamique, entièrement nouvelle, la sensibilité aux différences définissant la résolution des mesures, en proposant enfin comme unité photométrique — l'idée est pour le moins audacieuse — la lumière brève de l'étincelle électrique.

Chapitre 4

Photométrie des sources diversement colorées : un problème *récalcitrant*¹

Nouvelles recherches : les effets physiologiques sur la photométrie hétérochrome (1880-1900)

Selon l'historien David L. DiLaura, la photométrie industrielle moderne est née en 1879². L'année est en effet connue pour marquer les débuts de la lampe à incandescence, qui apporte la lumière électrique dans les appartements, en concurrence avec les becs lumineux, alimentés au dense réseau des sociétés gazières. L'explication de DiLaura ne s'arrête pas aux démonstrations par Joseph Wilson Swan (1828-1914) et Thomas Alva Edison (1847-1931) de la lampe à incandescence.

1879 marks not only the appearance of Zöllner's direct-reading photometer and Edison's demonstration of a practical incandescent lamp, but also the beginning of modern industrial photometrics. During the years from 1879 to 1909 the wider utility of photometrics was brought about by several concurrent developments in industry and commerce. The first was the rapid development of practical electrical generators and alternators provided a power source that allowed electric arc lighting to move from experiments and demonstrations to large-scale practical lighting systems. The

1. Ce chapitre a donné lieu à la publication d'un article de l'auteur sous la référence : Patrick Grelet, « La photométrie des sources colorées, un problème récalcitrant : L'apport de deux savants discrets, Jules Macé de Lépinay et William Nicati », *RHS*, 2023/1, tome 76, p. 135-172.

2. David L. DiLaura, [DiL01], p. cxcvi.

*second was Edison's development of a practical carbon filament electric incandescent lamp, the means to manufacture it on a large scale, and the electrical energy generation and distribution system to power it, offered an alternative to gas lighting.*³

Le déploiement urbain de l'éclairage au gaz, si heureusement nommé « de ville », a fait entrer la photométrie dans l'ère du contrôle industriel. L'éclairage électrique va, de son côté, élargir le champ d'application de la photométrie et soumettre à ses spécialistes de nouveaux sujets. L'éclairage électrique utilise désormais deux technologies : l'arc électrique et la lampe à filament de carbone. La première est d'abord pénalisée par le problème de la division de la lumière. Le vulgarisateur scientifique Guillaume Louis Figuier (1819-1894) décrit avec poésie le défi : « (...) pouvoir partager en mille petits flambeaux, l'ardent foyer lumineux que produit la lampe électrique. »⁴ L'arc électrique reste donc cantonné à l'illumination des grands espaces urbains et maritimes (lorsque les phares en sont équipés). La seconde difficulté est l'obtention d'un arc stable, difficulté en partie résolue, grâce à l'invention en France, par Léon Foucault⁵ du « régulateur » qui compense l'usure des charbons⁶, invention améliorée par Victor Serrin (1829-1905).⁷ Les bougies de Pavel Jablockhoff (1847-1894) offrent aussi une solution très élégante au problème de la consommation des charbons et vont donner lieu à une démonstration de prestige en 1878, sur l'avenue de l'Opéra à Paris. Les inventeurs, dans ce second XIX^e siècle avide de lumière, vont rivaliser d'ingéniosité pour offrir à une clientèle fortunée une « lampe à incandescence » d'appartement, qui utilise en fait un arc voltaïque muni d'un régulateur, nous dirions aujourd'hui « miniaturisé ». Inventions qui ne feront pas la prospérité de leurs créateurs : elles seront rapidement supplantées lorsque Swan et Edison auront résolu la question de la résistance électrique et de la fusibilité du filament porté à l'incandescence dans leurs propres lampes. Si la réflexion de DiLaura semble heureuse, correspond-elle vraiment à une naissance de la photométrie industrielle moderne ? Amenée à mesurer une lumière symbole de modernité, la photométrie

3. David L. DiLaura, *ibid.*, p. cxvii.

4. Louis Figuier, *Les Merveilles de la science*, Paris, Furne, Jouvot, 1870, tome 4, p. 228.

5. Simultanément, en Angleterre, par William Edwards Staite (1809-1854).

6. L. Foucault, *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, p. 313-328 ; « Appareil destiné à rendre constante la lumière émanant d'un charbon placé entre les deux pôles d'une pile ; », *CRAS*, 1849, tome 28, p. 68-69 et « Appareil photo-électrique ; », *CRAS*, 1849, tome 28, p. 698-699.

7. Une description complète du régulateur Serrin est donnée par Hippolyte Fontaine (1833-1910), *Éclairage à l'électricité, Renseignements pratiques*, 1879, 2^e édition, Paris, Librairie polytechnique, J. Baudry, p. 53-59.

semble payer le prix d'une lente évolution et est restée, pour certains électriciens, à l'état artisanal. « Malheureusement, nous devons constater que cette science n'a pas suivi l'électricité dans ses progrès. La photométrie industrielle n'existe pas encore. . . », peut-on lire dans le *Cadiat-Dubost*, édition de 1889⁸. Qu'en est-il de la photométrie en cette dernière partie de siècle qui voit le triomphe de l'électricité ?

Ce chapitre va tenter d'apporter une réponse à cette question, en évoquant l'un des défis que les photomètres auront à relever, pour faire entrer la photométrie dans la modernité : comment mesurer les pouvoirs éclairants des lumières modernes, celle du gaz, du pétrole lampant, de l'arc électrique et des jeunes ampoules à incandescence, sans être gêné par la différence de leurs teintes avec des lumières de référence encore mal définies.

La section 4.1 rappelle que la question chromatique, le sujet de la photométrie hétérochrome, est devenue l'affaire des électriciens et aussi celle des physiologistes.

La prise en compte dans les mesures photométriques des effets physiologiques, causés par les différences chromatiques va faire l'objet de recherches inédites, menées à Marseille par le physicien Jules Macé de Lépinay et le médecin ophtalmologiste William Nicati. La section 4.2 s'occupe de replacer ces personnalités peu connues dans leur siècle.

Les quatre sections suivantes décrivent la méthodologie utilisée par les deux savants pour répondre à la question de la comparaison des lumières colorées. La méthode de « l'acuité visuelle » (section 4.4) et la méthode de « l'égalité des ombres » (section 4.6) déjà anciennes vont bénéficier des améliorations prévues par Macé de Lépinay et Nicati pour réduire l'influence des effets physiologiques sur la précision des pointés.

La section 4.5 discute les démonstrations apportées par Macé de Lépinay et Nicati aux lois phénoménologiques permettant de quantifier certains phénomènes physiologiques, propres à la vision des couleurs comme l'effet Purkyně.

La discussion des résultats et leur croisement avec les valeurs obtenues par d'autres équipes occupe les deux sections suivantes, 4.7 et 4.8.

Enfin, la section 4.9 se penche sur la solution apportée par la spectrophotométrie au problème de la comparaison des intensités des sources colorées.

8. Nicolas-Ernest Cadiat, Lucien Dubost, *Traité pratique d'électricité industrielle*, 3^e édition, Paris, Librairie polytechnique, Baudry et Cie, 1889, p. 126.

4.1 La photométrie hétérochrome

Affaire d'électriciens et de physiologistes

Les équipements des laboratoires de photométrie industrielle ont été bien décrits par Adrien Palaz dans son *Traité de photométrie industrielle spécialement appliquée à l'éclairage électrique* ([Pal92]). Les revues spécialisées, celles des sociétés d'ingénieurs que voit prospérer le second XIX^e siècle, comme le *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, en France, le *Journal für Gasbeleuchtung* et l'*Electrotechnische Zeitschrift*, en Allemagne, les rapports des expositions internationales d'électricité (Paris 1867, Paris 1881, Munich 1882, Vienne 1883, Anvers 1885, etc.) sont autant de sources pour observer les progrès de l'instrumentation photométrique. Ces ouvrages copieux décrivent dans le détail les innovations d'ingénieurs consacrant leur inventivité à la limitation de l'erreur personnelle des pointés photométriques. Il est frappant de constater que la plupart de ces titres font référence à l'électricité et à l'électrotechnique. Il semble que la photométrie industrielle moderne soit devenue l'affaire des électriciens !

Il est certain que, dans la décennie 1870, l'électricité sort des laboratoires pour servir une industrie déjà florissante. En France, l'enseignement de l'électrotechnique acquiert ses lettres de noblesse dans la formation des futurs ingénieurs et chercheurs. Comme le démontre Christine Blondel, « la Sorbonne est gagnée à l'électricité industrielle »⁹, et de citer Jules Jamin (1818-1886), le directeur du laboratoire de recherches physiques de la Faculté des sciences de Paris, et Éleuthère Mascart, titulaire de la chaire de physique générale et expérimentale du Collège de France, qui, après être passés par l'optique, orientent résolument enseignement et recherche vers l'étude « plus tendance » des machines magnétoélectriques de L'Alliance¹⁰ et de la dynamo de Zénobe Gramme (1826-1901). Du 15 août au 15 novembre 1881, se tient à Paris l'Exposition internationale d'électricité. Dans le palais de l'Industrie, les puissantes génératrices « faiseuses de lumière » fascinent la foule dont les yeux se chauffent à la douce clarté des lampes de Thomas Edison. Collées aux transmetteurs Ader (Clément Ader, 1841-1925), les oreilles s'ébaubissent des auditions théâtrales téléphoniques. Créée pour l'occasion, sous le patronage de Théodore Du Moncel (1821-1884), la Lumière électrique rend compte dans ses pages des inventions du siècle. Comme le remarque Patrice Carré : « L'Exposition se situe dans ce qui semble être une phase privilégiée de l'histoire

9. Christine Blondel, « Les physiciens français et l'électricité industrielle à la fin du XIX^e siècle », *Physis : Rivista internazionale di storia della scienza*, 1998, 35/2, p. 245-271.

10. La compagnie parisienne L'Alliance était, à l'époque, un constructeur de machines électriques.

des sciences et des techniques, à la crête d'une vague d'innovations relayée par un considérable essor de la littérature de vulgarisation. »¹¹

À l'occasion de la manifestation, les salles du palais du Trocadéro se prêtent aux débats du Congrès international des électriciens. Organisées sous la direction de Georges Berger (1834-1910) qui a déjà dirigé la section étrangère de l'exposition universelle de 1878, ces assises de l'électricité réunissent à Paris, du 15 septembre au 5 octobre 1881, 250 scientifiques venus de 28 pays¹². La première section du congrès travaille à « l'adoption générale d'un système international de mesures électriques ». D'entrée de jeu, il lui faut trancher entre deux conceptions : les savants veulent exprimer les unités dites « pratiques » des électriciens, telles que le volt, l'ohm, le weber¹³ et le farad, en fonction d'unités fondamentales comme celles du système « électromagnétique CGS » (pour centimètre-gramme-seconde) promu par l'Association britannique (BA). À l'opposé, les ingénieurs préconisent une réalisation des unités par des étalons arbitraires, ainsi de l'ohm par l'étalon « mercuriel », proposé par Werner von Siemens (1816-1892)¹⁴. En deux jours, l'accord est obtenu grâce à l'entremise du Français Mascart entre l'Allemand Siemens (Werner von Siemens, 1816-1892) et le Britannique Thomson (William Thomson Lord Kelvin, 1824-1907).¹⁵ L'électricité triomphe ! La troisième section du congrès, en charge des « applications industrielles de l'électricité », doit décider « des mesures à prendre pour faciliter la comparaison des intensités lumineuses » et ouvrir la discussion des questions suivantes.

Mesure de l'intensité lumineuse des sources électriques. Comparaison des divers procédés photométriques. À défaut d'une unité absolue pour la définition des intensités lumineuses existe-t-il un type qui puisse être recommandé comme étalon international ?

11. Patrice A. Carré, Gaston Tissandier et H. Valette, « L'Exposition internationale d'électricité de 1881 à travers quelques textes », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, décembre 1983, n° 2, p. 63-84.

12. Ont fait le voyage Emil du Bois-Reymond, Hermann von Helmholtz, Gustav Kirchhoff, Werner von Siemens pour l'Empire allemand, William Thomson pour le Royaume-Uni, Henry Augustus Rowland pour les États-Unis d'Amérique. La République française est représentée par Jean-Baptiste Dumas, Éleuthère Mascart, Jules Jamin, Jules Violle...

13. Le weber est alors l'unité de l'intensité électrique au Royaume-Uni. En France, on utilise l'ampère.

14. L'ohm serait défini comme la résistance d'une colonne de mercure d'une section de 1 mm². Sa hauteur sera fixée par la Conférence internationale des Unités électriques, réunie en 1884.

15. L'affaire est racontée de façon savoureuse par Paul Langevin (1872-1946), dans son éloge d'Éleuthère Mascart, « L'oeuvre de Mascart : Leçon d'ouverture du cours de physique générale et expérimentale au Collège de France », *La Revue du mois*, 4^e année, (juil.-déc. 1909), tome 8, p. 385-406.

Est-il possible d'établir des règles simples pour les mesures photométriques ?¹⁶

Énoncé catégorique qui fait de la photométrie une compétence des électriciens et leur confie la mesure de l'intensité de la lumière, position qui sera d'ailleurs confirmée par les conférences internationales des Unités électriques de 1882 et de 1884. Si la feuille de route des congressistes tient dans ces quelques lignes, elle sous-tend deux questions fondamentales : la définition d'un étalon de lumière et la comparaison photométrique de lumières aux teintes différentes. Car il ne suffit pas de définir un étalon de lumière, il faut que les lumières lui soient comparables par leur teinte.

Les méthodes photométriques n'offrent en effet de précision acceptable qu'à une condition signalée de longue date, notamment par Christison et Turner dans leur étude comparative des pouvoirs éclairants du gaz de houille et du gaz d'huile (supra p. 146) : elles supposent implicitement que les sources à comparer (la source étalon et la source en essai) émettent des lumières de même teinte, comme des sources « blanches » de même *température*. Or ce n'est jamais le cas dans la réalité : les deux plages du photomètre dont on compare les éclairagements ou les ombres apparaissent diversement colorées et juger de l'égalité des intensités dans ces conditions conduit à d'importantes erreurs d'appréciation. Si tant est qu'un résultat soit fourni, l'expérience n'est ni répétable (le jugement de l'observateur varie d'une expérience à l'autre), ni reproductible (les résultats diffèrent d'un opérateur à l'autre). L'observateur se montre impuissant à séparer d'une lumière l'attribut de luminosité de celui de chromaticité. Comme en avertit le physiologiste allemand Hermann von Helmholtz (1821-1894)¹⁷, cette incapacité a plusieurs origines : d'ordre physiologique d'abord car propres à la perception des couleurs par les organes de la vision, d'ordre psychologique ensuite, quand elles induisent des erreurs d'appréciation. Ces phénomènes, comme l'effet Purkyně et le « contraste simultané » rendent ainsi illusoire toute tentative de comparaison objective des sources diversement colorées et, du même coup, font de la photométrie une science amenée à rester incomplète. La comparaison des sources diversement colorées intéresse la photométrie hétérochrome. Tant que les « photométristes » se sont limités à la comparaison des sources de lumière « blanche » en utilisant l'œil comme détecteur de zéro, ils se croyaient, note Vasco Ronchi, « convaincus de faire des mesures physiques sur une lumière physique. (...) La

16. Congrès international des électriciens, Paris, 1881, *Comptes rendus des travaux*, Paris, Masson, 1882, p. 33-34.

17. Hermann von Helmholtz, *Optique physiologique*, traduction d'Émile Javal et Nephtali-Théodore Klein, Paris, Victor Masson et fils, tome 1, 1867, p. 420.

seule vraie [photométrie] était la photométrie en lumière blanche. »¹⁸. Mais en lumière colorée, poursuit Ronchi, « l'élément physiologique l'emporte sur l'élément physique »¹⁹, insistant par là sur les doutes exprimés par le monde de la physique sur la validité des résultats de la photométrie hétérochrome.

Cette question non résolue et qualifiée de « *recalcitrant problem* » par l'historien Sean F. Johnston²⁰ ne remet pas seulement en cause la photométrie, empêchée par là de définir son propre étalon de lumière, elle attend des réponses pratiques quand l'industrie de l'éclairage doit contenter des consommateurs avides de lumière. Elle défie les ingénieurs lampistes qui comparent les pouvoirs éclairants des luminaires avec des étalons à flamme dont la constance est mise à mal, entre autres, par la pression atmosphérique, l'humidité de l'air servant à la combustion et donc les variations saisonnières²¹. Mais il faut se faire à l'idée que ce problème épineux ne peut trouver une solution pratique simple. Situé au croisement de la métrologie *physique* et de la métrologie *sensorielle*, le résoudre demande une connaissance fine des mécanismes de la vision des couleurs. Le sujet est complexe et implique des effets propres à la physiologie de l'œil et du « système visuel humain ». Il ne peut donc être traité par la seule physique qui doit se rapprocher d'autres sciences comme la psychologie, pour l'évaluation des sensations, et de ce qu'il est coutume d'appeler aujourd'hui les « neuro-sciences ». Celles-ci en sont encore à leur commencement mais Carl Bergmann (Carl Georg Lucas Christian Bergmann, 1814–1865) et Heinrich Müller (1820–1864) ont déjà identifié sur la rétine les cellules, cônes et bâtonnets, reconnues aujourd'hui comme les photorécepteurs rétiniens²². Un exemple de ce rapprochement nous est fourni par la collaboration étroite qu'ont entretenue à Marseille, à partir de 1879, le physicien français Jules Macé de Lépinay et le médecin ophtalmologiste franco-suisse William Nicati, coopération révélatrice d'un décloisonnement de la science française sur la question de la photométrie. Leurs recherches portant sur la « comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre » sont très rarement évoquées dans la littérature. Elles méritent pourtant une attention particulière car les données recueillies par ces deux auteurs constituent l'une des premières déterminations précises de la « courbe de visibilité » définissant l'« observateur photométrique de référence ».

18. Vasco Ronchi, *Histoire de la lumière*, traduction de l'italien par Juliette Taton, Paris, Librairie Armand Colin, 1956, p. 269.

19. Vasco Ronchi, *ibid.*, p. 274.

20. Sean F. Johnston, [Joh01], p. 148-151.

21. Voir Emil Liebenenthal, *Praktische photometrie*, Braunschweig, 1907, p. 116-117.

22. Voir L. Thibos, K. Lenner, C. Thibos, « Carl Bergmann (1814–1865) and the discovery of the anatomical site in the retina where vision is initiated », *Journal of the History of the Neurosciences*, doi : 10.1080/0964704X.2023.2286991, 2023.

4.2 Deux Marseillais d'adoption : Jules Macé de Lépinay et William Nicati



fig. 4.1 – Jules Macé de Lépinay.
*Annales de la Faculté des sciences
de Marseille*, Tome 14, fasc. 3

Jules Charles Antonin Macé de Lépinay naquit le 18 août 1851 à Grenoble²³ où son père, Antonin Pierre Laurent, exerçait comme professeur agrégé d'histoire à la faculté des lettres et appartenait, par là même, à l'élite intellectuelle de la ville dont Jean-Guy Daigle a donné une description très précise²⁴. Ce dernier encouragea certainement les études de ses deux fils : le frère aîné de Jules, Auguste, embrassera lui aussi une carrière dans l'enseignement comme professeur de mathématiques spéciales au lycée Henry IV de Paris. Reçu au concours d'entrée de l'École normale supérieure, puis au concours de l'agrégation de physique en 1875, Jules Macé de Lépinay commença

à enseigner au lycée de Grenoble puis sera nommé au lycée de Marseille, avant d'obtenir en 1880 un poste de maître de conférences à la faculté des sciences de la même ville. Il y mènera tout le reste de sa carrière jusqu'à sa mort en 1904.

Macé de Lépinay consacre ses premières recherches à l'optique cristalline. En 1877 — il est toujours professeur au lycée de Grenoble — il publie une première note sur « La polarisation chromatique des houppes dans les cristaux à deux axes »²⁵. Les houppes sont les figures colorées, observables à travers certaines lames cristallines, éclairées en lumière naturelle ou partiellement polarisée. Le phénomène découvert par Brewster en 1818 est bien décrit par Augustin Bertin-Mourot (1818-1884)²⁶. Macé de Lépinay poursuit ses re-

23. Sur la vie de Jules Macé de Lépinay, voir Henri Barré, *Les Bouches du Rhône, encyclopédie départementale* (dir. Paul Masson), tome 11 : Biographies, Marseille, 1913, p. 309. Voir aussi Charles Fabry, « Notice sur les travaux et la vie de Jules Macé de Lépinay », *Annales de la faculté des sciences de Marseille*, tome 15, fasc. 3., s.d.

24. Jean-Guy Daigle, *La culture en partage. Grenoble et son élite au 19e siècle*, Presses universitaires de Grenoble, 1977.

25. J. Macé de Lépinay, « La polarisation chromatiques des houppes dans les cristaux à deux axes », *Journal de physique théorique et appliquée*, 1877, p. 16-19.

26. A. Bertin, « Sur les houppes des cristaux polychroïques », *Journal de physique théorique et appliquée*, 1879, p. 217-227.

cherches à Grenoble sous la conduite du Professeur Jules Violle²⁷ et soutient en 1879 sa thèse de doctorat sur l'étude de *la double réfraction accidentelle*²⁸. La traversée des cristaux par la lumière peut donner naissance à deux rayons réfractés, le rayon ordinaire et le rayon dit *extraordinaire*. Ce phénomène de double réfraction — on dit aussi *biréfringence* — est naturel chez certains cristaux tandis que chez d'autres il est induit sous l'effet d'une contrainte thermique ou mécanique. Dans ce dernier cas, on parle de double réfraction accidentelle. Rompu aux techniques de l'optique instrumentale, c'est en tant que maître de conférences à la Faculté des Sciences de Marseille — il a été nommé en 1880 — que Macé de Lépinay va consacrer désormais toutes ses recherches à cette science.

La vie de William Nicati est relatée dans la notice nécrologique que lui a consacrée Victor Cuénod²⁹. William Nicati est né le 4 juillet 1850 à Salavas, en Ardèche, où son père était pasteur. Cuénod nous apprend comment ce dernier, soupçonné de républicanisme, dut quitter la France, après le coup d'état de 1851, pour s'installer, avec sa famille, à Morges, en Suisse. Le jeune Nicati y commence ses études secondaires pour les terminer à Lausanne avec l'obtention du baccalauréat. Se destinant à la médecine, il part pour Zürich et côtoie à l'université plusieurs personnages de la science helvétique comme Édouard Bugnion (1845-1939), vétérinaire et physiologiste vaudois, connu pour ses travaux en anatomie comparée et en biologie des insectes et Augustin Forel (1848-1931), entomologiste, neuroanatomiste et psychiatre. Il obtient son diplôme de médecin en 1873 en même temps qu'il mène une activité de recherche. Sous la direction de l'ophtalmologiste suisse Johann Friedrich Horner (1831-1886), il est chargé de poursuivre les investigations sur le « syndrome oculaire sympathique », ou syndrome de Claude Bernard-Horner, et soutient en 1873 une première thèse de doctorat sur ce sujet³⁰. Nicati exerce d'abord à Zürich comme chef de clinique du professeur Horner et comme répétiteur d'anatomie de l'université de la même ville.

27. Jules Violle, ancien élève de l'École normale supérieure, professeur à la faculté des sciences de Grenoble, accueille dans son laboratoire Macé de Lépinay. Nommé en 1879 à la faculté des sciences de Lyon, il travailla à l'élaboration d'un étalon de lumière. C'est ainsi que le nom de Violle est attaché à un étalon d'intensité lumineuse qui correspond à la lumière émise par 1 cm² de platine en fusion.

28. J. Macé de Lépinay, *Recherches expérimentales sur la double réfraction accidentelle*, thèse, Paris, Gauthier-Villars, 1879. et *ACP*, t. 19, 1880, p. 5-90.

29. V. Cuénod, *Nécrologie de William Nicati*, Revue médicale de la Suisse romande, année 51, 1931, n°5, p. 317-320.

30. William Nicati, *La paralysie du nerf sympathique cervical, étude clinique*, 1873, Lausanne, H.Mignot, Paris, Adrien Delahaye.



fig. 4.2 – L'un des rares portraits de William Nicati.

Le cinquantenaire de la librairie Reinwald Schleicher frères, Paris, 1899.

Puis il quitte la Suisse pour les Pays-Bas afin de se former auprès de nouveaux maîtres. Il fréquente les cliniques de Franciscus Donders (1818-1889) considéré avec Helmholtz comme l'un des fondateurs de l'ophtalmologie scientifique et de Herman Snellen (1834-1908) connu pour avoir imaginé une méthode de mesure de l'acuité visuelle³¹. Il se rend ensuite à Paris où il rencontre les grands noms de l'ophtalmologie : Louis de Wecker (1832-1906) et Xavier Galezowski (1832-1907), le fondateur du *Journal d'ophtalmologie*. Accueilli au laboratoire d'histologie du Collège de France dirigé par Louis-Antoine Ranvier (1835-1922), ancien assistant de Claude Bernard (1813-1878), Nicati

soutient en 1875 une seconde thèse de doctorat³². On retrouve ensuite Nicati à Marseille car cette ville est dépourvue de médecin ophtalmologiste. Pour exercer son activité, il fonde une clinique d'ophtalmologie au n°1 de la rue des Fabres où il monte un laboratoire. Dans ce laboratoire indépendant, il poursuit ses recherches en histologie donnant lieu à plusieurs publications³³.

À Marseille, Nicati fait la connaissance de Macé de Lépinay. Le médecin ophtalmologiste s'associe au physicien pour mener à bien ses recherches sur la perception des couleurs et sur l'acuité visuelle, domaines qui l'intéresseront tout au long de sa carrière. Pour le spécialiste de l'optique physique qu'est Macé de Lépinay, cette rencontre est aussi décisive car elle va lui ouvrir un nouveau champ de recherche en optique physiologique. Dans son discours de

31. Présent dans les cabinets d'ophtalmologie, le tableau de Snellen présente au sujet des rangées de motifs appelés « optotypes », de couleur noire sur un fond blanc. Leur taille va en diminuant en partant du haut du tableau. Placé à une distance fixe du tableau, le sujet voit chaque caractère sous un angle à partir duquel se calcule l'acuité visuelle.

32. William Nicati, *Des fibres nerveuses dans les nerfs optiques et dans la rétine*, 1875, A.Parent, Paris.

33. W. Nicati, « De la distribution des fibres nerveuse dans le chiasma des nerfs optiques », *Travaux du laboratoire de la rue des Fabres à Marseille*, Barlatier-Feissat, Marseille, 1881 ; W.Nicati, A. Richaud, « Recherches sur la cirrhose biliaire du lapin domestique », *Travaux du laboratoire de la rue des Fabres à Marseille*, Barlatier-Feissat, Marseille, 1881 et *Archives de physiologie normale et pathologique*, Paris, 1880, sér. 2, tome 7.

réception à l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Marseille, le mathématicien Victor Jamet (1853-1919), élu en 1908 au fauteuil de Macé de Lépinay, déclare : « dans une étude complète sur l'optique, il était indispensable d'étudier à fond cet instrument essentiellement délicat, l'œil humain. C'est pourquoi Macé de Lépinay s'adjoignit, dans ses recherches d'optique physiologique, un collaborateur qui fut pour lui un précieux auxiliaire et un ami dévoué, M. le docteur Nicati. »³⁴

Dès l'année 1879, à peine installés dans la cité phocéenne, et pendant quatre années, les deux savants vont se consacrer à leurs expérimentations sur la vision des couleurs, en particulier chez les sujets atteints de dyschromatopsies — en langage courant, « daltoniens » —, ainsi qu'ils l'expliquent dans leur premier mémoire publié en 1881.

Le but général des recherches que nous avons entreprises depuis plus de deux ans déjà et dont nous publions ici la première partie est le suivant : comparer avec les résultats de l'expérience les conséquences que l'on peut tirer des théories de la vision des couleurs qui ont cours aujourd'hui, celle de Young et celle de Hering ('). (...) Imaginons que, par un procédé quelconque, l'on puisse arriver à produire un spectre tel qu'il paraisse, pour un observateur doué d'une vue normale au point de vue des couleurs (c'est-à-dire ne présentant aucune trace de daltonisme), uniformément éclairé dans toutes ses parties ('). Qu'arrivera-t-il si nous le présentons à un daltonien qui ne voit pas le rouge ?³⁵

Deux théories se disputent à l'époque la réponse à cette question : la théorie dite de « Young-Helmholtz-Maxwell » et la théorie de Hering. La première théorie est fondée sur le fait *trichrome*. Elle repose sur l'idée que si, du point de vue physique, il est possible d'observer une infinité de couleurs, il n'existe, du point de vue physiologique, que trois sensations fondamentales, celles du « rouge », du « vert » et du « bleu », qui correspondent à l'existence de trois types de récepteurs rétiniens, chacun d'eux plus spécifiquement sensible aux radiations émises dans chacun de ces domaines du spectre visible. Dans ce cadre, le daltonisme s'explique facilement par une déficience de l'un

34. Victor Jamet, « Discours de réception de M. Victor Jamet, membre de la classe des sciences », *Mémoires de l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Marseille*, Marseille, Barlatier, 1908.

35. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, « Recherche sur la comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre », *ACP*, novembre 1881, sér. 5, tome 24, (*mémoire de 1881 par la suite*), p. 289-291.

des canaux rétiniens³⁶. La théorie d'Ewald Hering (1834-1918) est plus subtile. Elle propose l'existence de six sensations fondamentales, regroupées par paires antagonistes : la paire rouge-vert, la paire bleu-jaune et enfin la paire de la luminosité ou paire blanc-noir. Cette idée est fondée sur les observations suivantes : s'il est possible de passer progressivement d'un champ chromatique à un autre champ chromatique d'une autre paire, par exemple du rouge au jaune ou du bleu au vert, cette transition progressive est impossible entre couleurs d'une même paire : entre le rouge et le vert, il n'existe pas de rouge tirant sur le vert ; de même, entre le jaune et le bleu, on ne trouve pas de jaune tirant sur le bleu³⁷. On peut déduire de cette description que si l'une des sensations, par exemple le rouge, vient à manquer chez un daltonien, la sensation complémentaire, en l'occurrence le vert, est également déficiente chez le sujet. Au moment où Macé de Lépinay et Nicati commencent leur étude, la controverse n'est toujours pas tranchée et ils ambitionnent de soumettre à l'expérience les deux théories de la vision des couleurs.

Dans une première étude, datée de 1879³⁸, Macé de Lépinay et Nicati comparent la vision de sujets daltoniens et de sujets normaux, dans différentes régions du spectre solaire. Ils repèrent, dans une population de neuf cent vingt-cinq garçons et de deux cent quarante et une jeunes filles des lycées de Marseille et de Grenoble et du collège d'Aix en Provence, trente-trois daltoniens parmi les garçons et une daltonienne parmi les filles. Le dépistage est effectué selon la méthode de Frithiof Holmgren (Holmgren, 1831-1897) qui consiste à présenter au sujet une série d'écheveaux de laines colorées et à les lui faire comparer à des types préalablement définis (par exemple le type A pour le vert, le type B pour le violet, le type C pour le rouge). La caractérisation de la vision repose sur l'évaluation de l'intensité lumineuse, perçue par le sujet (il s'agit ici d'une sensation) dans les différentes parties du spectre solaire. La mesure de cette intensité peut se faire de manière indirecte en estimant l'acuité visuelle du sujet qui diminue en même temps que l'intensité lumineuse perçue. À l'aide d'un spectroscope à prisme est projeté sur

36. En 1801, Young proposa de limiter les récepteurs rétiniens à trois types correspondant à trois couleurs principales : le rouge, le jaune et le bleu. Cette idée fut développée par Helmholtz et vérifiée expérimentalement par Maxwell qui proposèrent un autre ensemble de couleurs : le rouge, le vert et le bleu (en fait le violet).

37. Considéré comme couleur secondaire, dans la terminologie moderne de synthèse des couleurs, car il peut s'obtenir par un mélange de rouge et de vert, le jaune est une des couleurs fondamentales dans la théorie de Hering car il ne fait apparaître ni la présence du rouge, ni celle du vert. Les autres couleurs secondaires, le cyan (mélange de bleu et de vert) et le magenta (mélange de rouge et de bleu) laissent, quant à elles, facilement deviner les teintes primaires qui les constituent.

38. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, « Recherches sur le daltonisme », *CRAS*, 1879, tome 89, n° 17, p. 716-718.

une règle graduée le spectre de la lumière du Soleil. Sur cette règle, glisse un motif de petite taille (5 mm de côté) représentant une lettre de l'alphabet. La méthode consiste à évaluer, pour chaque position du motif dans le spectre, la distance d dont le sujet daltonien doit se rapprocher pour percevoir le symbole et à la comparer à la distance D mesurée par un sujet à vision normale. Macé de Lépinay et Nicati vont vite constater une diminution du rapport $\frac{d}{D}$ vers les extrémités rouge et violette du spectre, ce qui correspond aux deux types de daltonismes connus à leur époque, mais ils remarquent également, chez deux sujets, une diminution sensible de l'acuité visuelle, dans la région verte du spectre³⁹. Ils mettent ainsi en évidence une troisième forme de daltonisme. Macé de Lépinay et Nicati tentent de préciser la relation entre l'intensité lumineuse et l'acuité visuelle et constatent qu'en faisant varier l'intensité dans un rapport de 1 à 4, l'acuité visuelle ne varie que de 1 à 1,34. Ils doivent cependant admettre que la relation entre les deux grandeurs n'est pas simple.

Dans une seconde note datée du mois de décembre 1880, les deux savants rapportent les résultats relatifs à quatre sujets daltoniens⁴⁰. La représentation graphique (figure 4.3) de ces données montre clairement que pour l'un des sujets la vision est déficiente dans le domaine du vert (autour de $0,5 \mu m$, la courbe est au-dessous des données de l'observateur normal) tandis que la sensation est exagérée dans le rouge. Pour les trois autres cas la déficience se situe dans le rouge (pour les longueurs d'onde supérieures à $0,6 \mu m$). On remarque également que pour ces trois derniers observateurs, la perception dans le vert est meilleure que pour l'œil de référence. Forts de ces résultats, les deux chercheurs peuvent affirmer l'existence de deux formes distinctes de daltonisme : daltonisme pour le rouge avec perception intacte et même exagérée des rayons verts et daltonisme pour le vert avec perception intacte ou exagérée des rayons rouges. La mise en évidence de trois types de daltonisme bat donc en brèche la théorie de Hering qui ne peut se satisfaire du daltonisme pour l'une seulement des deux couleurs appariées.

En revanche, elle confirme la théorie de Young-Helmholtz-Maxwell et l'hypothèse de trois types de photorécepteurs rétiniens, correspondant à trois couleurs fondamentales : le rouge, le vert et le violet.

39. Le minimum d'acuité se situant entre les lignes correspondant aux raies d'absorption E et F du spectre et la mesure donnant une différence de 0,6 m entre d et D .

40. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, « De la distribution de la lumière dans le spectre solaire (spectre des daltoniens). », *CRAS*, décembre 1880, tome 91, p. 1078-1080.

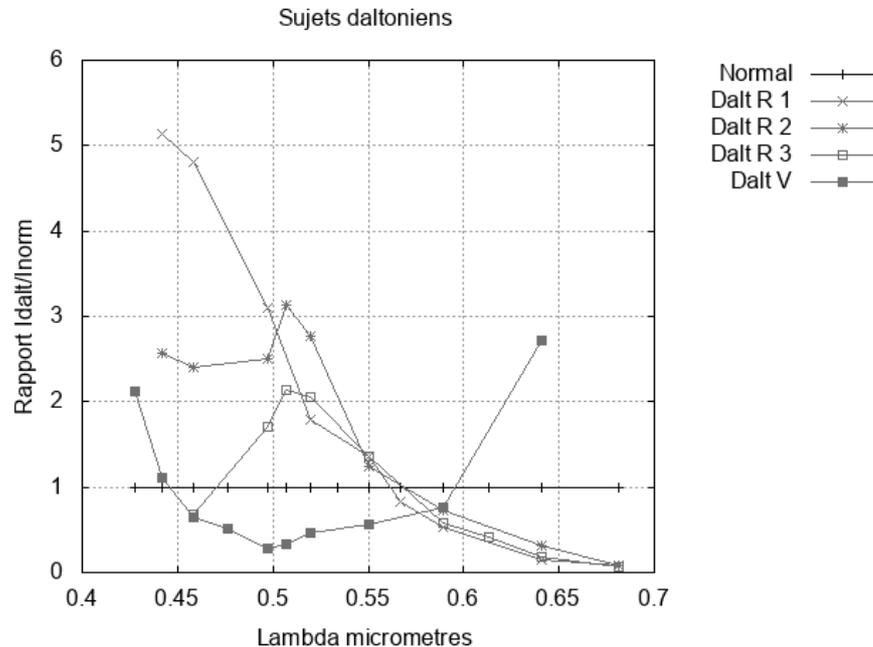


fig. 4.3 – Rapport de l'intensité de la sensation en fonction de la longueur d'onde pour des sujets daltoniens. D'après les résultats de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, *CRAS*, décembre 1880, tome 91, p. 1078.

4.3 Comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre

Les recherches entreprises en 1879 par Macé de Lépinay et Nicati vont se poursuivre sur cette question fondamentale de la photométrie hétérochrome : comparer les effets sur l'œil des différentes radiations visibles, présentes dans la lumière solaire. Cette comparaison doit se faire sur les yeux de sujets normaux d'abord et se poursuivre sur ceux de sujets daltoniens. Comme ils le soulignent en introduction de leur second mémoire publié en octobre 1883⁴¹, leur étude présente un grand intérêt pour l'industrie de l'éclairage naissante qui a besoin de méthodes rigoureuses pour comparer les pouvoirs éclairants des sources lumineuses artificielles dont les émissions varient notablement d'un appareil à l'autre : les lampes à huile émettent plutôt une lumière jaune tandis que celle de l'arc électrique est teintée de bleu. Ces méthodes ne peuvent se passer de connaissances approfondies sur la vision

41. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, « Recherches sur la comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre », *ACP*, octobre 1883, sér. 5, tome 30, (Mémoire de 1883 par la suite), p. 145-146.

des couleurs et des apports de l'optique physiologique dans le champ de la photométrie. Macé de Lépinay et Nicati l'expriment sans ambages, en citant Helmholtz : « Le problème de la photométrie des couleurs appartient donc au domaine de l'Optique physiologique. »⁴²

La distribution de l'intensité lumineuse dans le spectre solaire n'est pas un sujet nouveau et plusieurs auteurs du XIX^e siècle, se sont essayés à ces mesures avec plus ou moins de bonheur et pour des résultats d'une précision moyenne. Qu'en est-il précisément de l'état de l'art en 1880, lorsque Macé de Lépinay et Nicati commencent leur travail ? Au début du siècle, la réfrangibilité du « calorique » et sa parenté avec le fluide lumineux avaient été prétextes à de nombreuses expériences. Dès 1800, William Herschel (1738-1822) avait fourni une description du spectre solaire, tant lumineuse que calorifique. Dans son *Traité élémentaire de physique*, Daguin se contente de dire que l'astronome avait placé le maximum de l'intensité lumineuse entre les régions jaune et verte du spectre « en cherchant à quelle distance maximum il pouvait lire une page imprimée, quand elle était éclairée successivement par les différentes parties du spectre. »⁴³ Dans son souci d'améliorer les conditions d'observation du Soleil avec de larges télescopes, Herschel avait d'abord constaté, en plaçant des verres opacifiants de différentes couleurs, sur le trajet de la lumière solaire, que certains verres semblaient plus aptes à transmettre la chaleur que la lumière, d'autres au contraire favorisant la lumière au détriment de la chaleur :

*(...) it occurred to me, that the prismatic rays might have the power of heating bodies very unequally distributed among them; and, as I judged it right in this respect to entertain a doubt, it appeared equally proper to admit the same with regard to light. If certain colours should be more apt to occasion heat, others might, on the contrary, be more fit for vision, by possessing a superior illuminating power.*⁴⁴

Herschel étaya cette hypothèse en soumettant à diverses mesures les rayons issus de la traversée d'un prisme par la lumière du soleil. Une première série

42. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, Mémoire de 1883, p. 146.

43. P. A. Daguin, *Traité élémentaire de physique théorique et expérimentale*, Toulouse, Édouard Privat, et Paris, Dezobry Tandou, 1862, Tome 4, p. 248.

44. W. Herschel, « XIII. Investigation of the Powers of the prismatic Colours to heat and illuminate Objects; with Remarks, that prove the different Refrangibility of radiant Heat. To which is added, an Inquiry into the Method of viewing the Sun advantageously, with Telescopes of large Apertures and high magnifying Powers. », *Phil. Trans.*, 1800, vol. 90, p. 256.

d'expériences lui permit d'évaluer le pouvoir calorifique des rayons « colorifères », par leur action sur plusieurs thermomètres placés sur le trajet des différentes lumières. Il en tira la conclusion que la répartition du pouvoir calorifique est loin d'être uniforme dans le spectre, en montrant cependant son maximum dans le rouge. Dans la seconde série d'expériences portant sur le pouvoir éclairant, Herschel fait une distinction assez subtile entre l'« *illumination* »⁴⁵ et l'aptitude à permettre la vision distincte :

*In the following examination of the illuminating power of differently-coloured rays, I had two ends in view. The first was, with regard to the illumination itself; and the next, with respect to the aptness of the rays for giving distinct vision; and, though there did not seem to be any particular reason why these two should not go together, I judged it right to attend to both.*⁴⁶

Les manipulations utilisaient divers objets opaques, présentant des défauts ou des détails minuscules, placés dans le champ d'un microscope éclairé par les différents rayons « prismatiques ». L'astronome put ainsi établir que les meilleures conditions d'inspection du motif se situaient dans le jaune et le vert et qu'elles se dégradèrent vers les extrémités rouge et violette du spectre. Les résultats qualitatifs de ces observations font cependant apparaître le caractère d'« *illumination* » et la capacité à être perçu de l'objet. Herschel conclut enfin que le pouvoir éclairant maximum se situe entre le jaune et le vert :

The maximum of illumination lies in the brightest yellow, or palest green. The green itself is nearly equally bright with the yellow; but, from the full deep green, the illuminating power decreases very sensibly. That of the blue is nearly upon a par with that of the red; the indigo has much less than the blue; and the violet is very deficient.

*With regard to the principle of distinctness, there appears to be no deficiency in any one of the colours.*⁴⁷

La méthode indirecte, suivie par Herschel était fondée sur les différences accusées par l'acuité visuelle dans les différentes régions du spectre. Bien que très qualitatives, les observations d'Herschel furent confirmées un peu plus tard, en 1815, par Joseph von Fraunhofer (1787-1826) qui utilisa, quant

45. Compte tenu du contexte, le mot peut se traduire ici par « éclairage » dans le sens : l'objet apparaît-il bien ou mal éclairé ?

46. W. Herschel, *ibid.*, p. 262.

47. W. Herschel, *ibid.*, p. 268.

à lui, la comparaison directe de deux plages colorées. Fort de son habileté, l'opticien munichois s'estimait capable de surmonter la difficulté d'appréciation de la luminosité. Étudiant le pouvoir dispersif de différents verres et les aberrations chromatiques qui en résultent, Fraunhofer avait vu la nécessité de connaître l'intensité de chaque couleur du spectre⁴⁸. Le photomètre de Fraunhofer permettait de comparer deux plages contiguës, l'une éclairée par la portion du spectre à étudier, l'autre par la lumière réfléchie par un miroir plan, d'une petite lampe à huile, servant de source de référence. Pour chaque zone du spectre observée, Fraunhofer pouvait évaluer, en déplaçant la source de référence de façon précise, à l'aide d'une crémaillère, le moment où la séparation entre les deux plages devenait la moins visible (les intensités de la source de référence et de la lumière spectrale sont alors égales). En appliquant la loi des distances de Bouguer, il pouvait obtenir les intensités relatives des différentes parties du spectre. En se repérant sur les raies noires d'absorption du spectre solaire, qu'il venait de mettre en évidence, il parvint à déterminer la position du maximum d'intensité entre les deux raies *D* et *E* délimitant le domaine entre le jaune et le vert : « L'endroit le plus clair se trouve à peu près à un tiers ou à un quart de *D* à *E*. On ne peut le déterminer plus exactement, ce qui n'est pas non plus ici d'une nécessité absolue »⁴⁹. Fraunhofer, motivé surtout par sa recherche sur l'achromatisme des lentilles, pouvait se contenter de ces résultats approximatifs mais corrects. Il est en effet intéressant de noter, comme l'ont fait Michel Saillard et Yves Cortial⁵⁰ que les valeurs numériques obtenues par l'opticien munichois conduisent, avec les corrections d'échelle nécessaires, à une courbe proche de la *courbe de visibilité* normalisée par la CIE (Commission internationale de l'éclairage), plus d'un siècle plus tard.

Parmi les autres contributions à cette question, Macé de Lépinay et Nicati font également mention, dans leur mémoire de 1881, de la méthode adoptée par Karl von Vierordt (1818-1884), professeur de physiologie à l'université de Tübingen, qui utilise le principe de Bouguer évoqué à plusieurs reprises (supra p. 41). Si l'oeil observe deux surfaces voisines, éclairées des quantités de lu-

48. J. Fraunhofer, « Bestimmung des Brechungs und Farbenzerstreuungs Vermögens verschiedener Glasarten in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernrohre », *Denkschriften der Bayerischen Akademie der Wissenschaften*, 1815.

49. J. Fraunhofer, « Détermination du pouvoir réfringent et dispersif de différentes espèces de verre, recherches destinées au perfectionnement des lunettes achromatiques », *Astronomische Abhandlungen herausgegeben von H. C. Schumacher*, Altona, 1823, p. 36-37.

50. Michel Saillard, Yves Cortial, « Calcul de la courbe d'efficacité lumineuse spectrale de l'oeil effectué à partir des mesures des intensités des différentes couleurs du spectre solaire de Josef Fraunhofer (1817) », *RHS*, 1993, tome 46, n°2-3, p. 259-272.

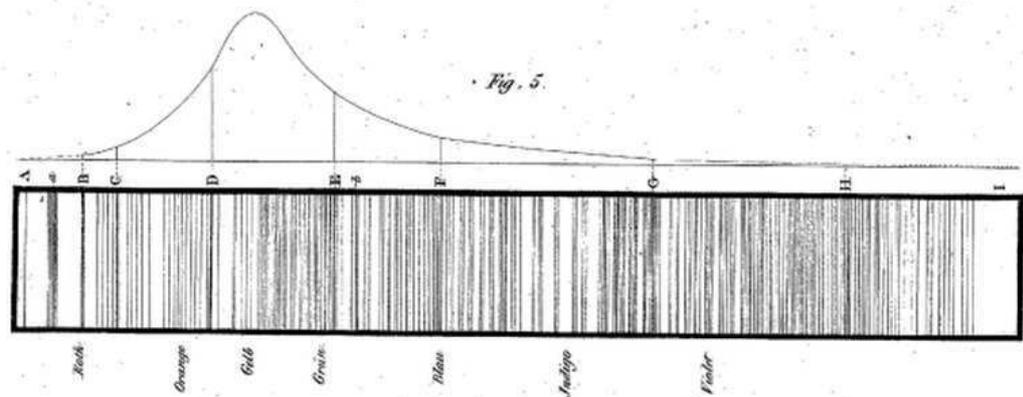


fig. 4.4 – Intensités lumineuses et raies d’absorption du spectre solaire, déterminées par Fraunhofer, *Annalen der Physik (Gilbert’s Annalen)*, 1817, vol. 57.

mière Q et $Q + Q/64$, il ne perçoit aucune différence d’intensité. Vierordt projette sur un spectre prismatique l’image d’une fente rectangulaire, horizontale, éclairée par une lampe dont il peut régler l’intensité à volonté⁵¹. L’image de la fente est donc éclairée à la fois par la lumière spectrale et par la lumière blanche de la lampe. Si l’on diminue l’intensité de celle-ci, l’observateur verra la surface éclairée de la fente disparaître progressivement dans chaque zone colorée du spectre. Au point de cette disparition, l’intensité de la lumière est, selon l’estimation de Bouguer, une fraction constante ($1/64$) de l’intensité lumineuse dans la région correspondante du spectre. Le procédé de Vierordt, surnommé sous la plume imagée de Bouasse (Henri Bouasse, 1866-1953) « la méthode de noyage », soulève plusieurs remarques : en particulier elle conduit à utiliser la loi de Bouguer sur des sources colorées quand elle n’a été établie que pour des sources de lumières « blanches » (flamme de bougie ou de lampe à huile). De plus, l’addition de lumière blanche à la lumière spectrale modifie la saturation de la couleur, ce qui influence de façon significative la perception de l’intensité. L’objection est soulevée par Bouasse en ces termes :

L’addition d’une petite quantité de lumière blanche modifie non seulement *l’éclat* de la région du spectre qui la reçoit, mais encore la *saturation* de la teinte.

Or le principe de Bouguer ne dit pas que l’œil juge avec une sensibilité constante des variations de la saturation. La méthode

51. Karl von Vierordt, *Beschreibung einer photometrischen Methode zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes*, Leipzig, *Annalen der Physik und der Chemie, Poggendorffs Annalen*, 1869, tome 137, p. 200-222 et *ACP*, 1869, tome 18, p. 493-494.

compare, si l'on veut, les pouvoirs éclairants, mais à la condition de les définir comme la propriété de *noyer* une certaine quantité de lumière blanche, ce qui est arbitraire.⁵²

Le mémoire signale enfin les travaux de John William Draper (1811-1882) dont la méthode, comme celle de Vierordt, est fondée sur le principe de Bouguer. Sur le spectre prismatique de la lumière fournie par un bec Bunsen, est superposée la lumière blanche d'une seconde source que Draper désigne « *extinguishing light* ». Draper affirme que la disparition successive des couleurs spectrales commence par les plus réfringibles pour se terminer par le rouge. Cela semble indiquer que le maximum d'intensité correspond à cette région du spectre, en contradiction avec l'opinion admise à l'époque qui le place dans le jaune. Draper attribue la diminution de l'intensité, des couleurs les moins réfringibles vers les plus réfringibles, à ce qu'il appelle la « *compression* » que le prisme impose aux régions colorées du spectre :

*From these observations I think that the luminous intensity of the coloured spaces has a relation to the compression or condensation that the prism is impressing upon them. It may be that, properly considered, the intrinsic intensity of the light is the same for all.*⁵³

Il est possible, selon lui, que l'intensité lumineuse reste identique dans toutes les régions du spectre. Cette vérification peut se faire en dispersant la lumière par un *réseau* qui offre un spectre « normal » pour lequel les largeurs des régions colorées sont proportionnelles aux intervalles des longueurs d'ondes. Draper affirme observer une extinction identique dans toutes les régions du spectre de diffraction, tant de la lumière solaire que de celle du gaz d'éclairage. Si Macé de Lépinay et Nicati mentionnent les résultats singuliers du Britannique, c'est pour conclure que les méthodes indirectes, utilisées par Vierordt et Draper, génèrent des erreurs systématiques et trop d'incertitudes pour être employées telles quelles dans une étude de la vision des couleurs.

Cet historique révèle que la comparaison photométrique des radiations du spectre peut être envisagée a priori selon deux approches fondées sur deux fonctions différentes de l'œil : « voir et distinguer ». La première d'entre elles, « Voir », est la faculté de l'œil de ressentir les variations d'intensité lumineuse et d'apprécier l'égalité de deux plages éclairées. Les deux savants estiment qu'avec un photomètre de Rumford, il est possible d'évaluer l'égalité

52. Henri Bouasse, *Vision et reproduction des formes et des couleurs*, Paris, Librairie Delagrave, 1917, p. 185.

53. J. W. Draper, « On a new form of spectrometer, and on the distribution of the intensity of light in the spectrum », *Phil. Mag.*, 1879, ser. 5, vol. 8, p. 75-80.

des ombres, quelque différentes que soient leurs colorations, à la condition de procéder sur des plages de petites dimensions. Selon le traité d'ophtalmologie de Louis de Wecker et d'Edmond Landolt (1846-1926), pour qu'une couleur soit reconnue, il faut qu'elle comporte une étendue telle que l'angle visuel soit, pour les yeux normaux, supérieur à cinquante secondes d'arc⁵⁴. En réduisant le champ d'observation, on atténue la sensation colorée et, par cet artifice, un problème de photométrie hétérochrome se ramène à une comparaison photométrique ordinaire.

L'autre faculté de l'œil, « distinguer », traduit sa capacité à percevoir les détails : elle est utilisée pour le déchiffrement des caractères imprimés et se mesure par l'acuité visuelle. Il est facile d'observer que celle-ci s'affaiblit comme l'intensité de l'éclairage et ce phénomène est indépendant de la coloration de la lumière éclairante. Cela admis, le principe de la méthode est simple : deux lumières sont égales en intensité lorsqu'elles produisent sur l'œil le même effet indépendant de leur couleur, en particulier lorsque, éclairant le même objet incolore, elles le font percevoir avec la même netteté et ramènent l'acuité visuelle de l'observateur à la même valeur. La comparaison des régions du spectre par la mesure de l'acuité n'est pas une idée neuve. Reprise par Macé de Lépinay et Nicati, elle l'est aussi, et simultanément, par d'autres physiciens, dont André Prosper Paul Crova (1833-1907), professeur à la faculté des sciences de Montpellier et Charles-Jacques-Henri Lagarde (1856-1890), pour leur étude du pouvoir éclairant des radiations simples⁵⁵. Dès lors, la stratégie des deux Marseillais s'établit ainsi : dans une première approche, mesurer les différences d'intensités dans le spectre solaire par la méthode indirecte de l'acuité visuelle, étude qui fait l'objet du mémoire de 1881 ; par un second travail (qui sera publié en 1883), comparer les pouvoirs éclairants dans le spectre, en améliorant la méthode de Fraunhofer par l'usage d'un photomètre de Rumford, sur un champ d'observation réduit. Si la comparaison photométrique des radiations du spectre peut être envisagée a priori sous ces deux approches, il est possible, comme le soulignent les deux auteurs, que ces dernières conduisent à des résultats numériques différents, par suite de la complexité des phénomènes propres à la vision : le sens de la vue n'est pas sollicité de la même façon par les deux procédés.

Mais si la méthode directe des ombres égales et celle indirecte de l'acuité visuelle ont déjà permis une caractérisation du spectre solaire, les résultats de ces précédentes comparaisons photométriques, tempèrent Macé de Lépinay

54. L. de Wecker et E. Landolt, *Traité complet d'ophtalmologie*, Paris, Delahaye, 1879, tome 1, p. 548.

55. André Crova, Charles-Jacques-Henri Lagarde, « Détermination du pouvoir éclairant des radiations simples », *CRAS*, 1881, tome 93, p. 959-961.

et Nicati, ne peuvent être considérés comme indiscutables. Ces expériences ont en effet négligé le phénomène de Purkyně. Signalé en 1825 par le neurophysiologiste Jan Evangelista Purkyně (1787-1869)⁵⁶, cet effet visuel est incontournable en photométrie hétérochrome. Le savant tchèque relate comment, en observant à l'aube l'apparition des couleurs, il constata que le bleu se révélait en premier tandis que les couleurs ordinairement les plus vives, le rouge et le vert, apparaissaient sombres plus longtemps. Sous une grande quantité d'éclairage, par exemple à la lumière du jour, ce sont les rouges et les jaunes, c'est-à-dire les couleurs les moins réfrangibles, qui se montrent les plus éclatants. Sous de faibles éclairagements, à l'aube ou à la tombée du jour, ce sont inversement les bleus et les couleurs les plus réfrangibles qui se détachent le plus⁵⁷. Pour rendre compte de la réalité de ce phénomène, Helmholtz a imaginé l'expérience suivante : il isole dans un spectre prismatique la région du jaune et la région du violet⁵⁸. Si une tige opaque est placée dans le champ éclairé par les deux lumières, il se projette sur l'écran deux ombres qu'il lui est possible, par un réglage des fentes laissant passer les deux lumières, de faire paraître également éclairées. Une fois cette condition réalisée, Helmholtz observe :

L'expérience montre qu'il suffit d'une faible augmentation de l'intensité d'éclairage pour faire paraître le jaune plus fort que le violet, et d'une faible diminution pour produire le résultat inverse. Cette différence est bien moindre lorsqu'on prend deux couleurs de la moitié la moins réfrangible du spectre, elle est plus grande lorsque les deux appartiennent à la moitié la plus réfrangible ; elle atteint sa plus grande valeur lorsqu'on prend les deux couleurs aux extrémités du spectre.⁵⁹

On tire de cette expérience la conclusion que la comparaison de l'intensité d'une source bleue ou violette à celle d'une source jaune, prise pour référence, conduit à des valeurs différentes selon les conditions dans lesquelles est effectuée cette comparaison, ce que le physiologiste et physicien allemand résume par la formule suivante : « L'intensité de la sensation est une fonction de l'intensité lumineuse qui diffère suivant l'espèce de lumière. »⁶⁰

56. Prononcer *pourquinié*.

57. J. E. Purkyně, *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne*, Berlin, G.Reimer, 1825, tome 2, p. 109.

58. Le montage est décrit par Helmholtz dans son *Optique physiologique*, traduction par E. Javal et N. Th. Klein, Paris, Masson, 1867, tome 1, p. 403-404.

59. H. von Helmholtz, *ibid.*, p. 420.

60. H. von Helmholtz, *ibid.*, p. 420.

Il est admis, au temps de Helmholtz, que la sensation ne croit pas proportionnellement à l'excitation, sauf à considérer une excitation de petite amplitude, mais suit la loi logarithmique de Fechner :

$$S = A \cdot \ln(E) + C$$

où S représente la sensation et E l'excitation, A et C étant deux constantes. Cette loi n'est pas exempte de critiques et doit être corrigée lorsque l'excitation devient nulle et pour les grandes valeurs de cette dernière, la sensation devant, en ce cas, atteindre une valeur qu'elle ne peut pas dépasser. La constante A doit en fait être considérée comme une fonction de E . Pour décrire le phénomène de Purkyně, Helmholtz propose une représentation (fig. 4.5) qui montre l'évolution de la sensation en fonction de l'intensité lumineuse objective, pour deux lumières de « qualités » (longueurs d'onde) différentes :

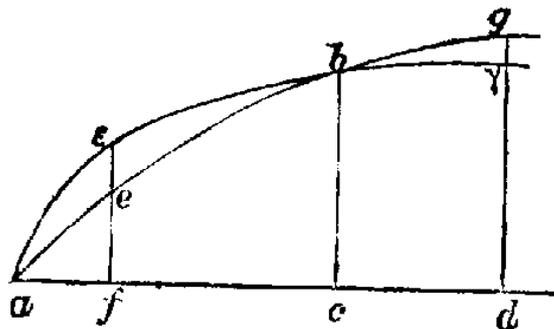


fig. 4.5 – L'intensité de la sensation en fonction de l'intensité objective pour deux radiations de couleurs différentes. Tiré de H. von Helmholtz, *ibid.*, Fig. 128, p. 422.

Ainsi, la courbe $aebg$ est l'image de l'évolution de la sensation pour la radiation la moins réfrangible (jaune), tandis que la courbe $aεbγ$ correspond à la radiation la plus réfrangible (violette). Les deux courbes se coupent au point (c, b) pour lequel les ombres paraissent égales. Si de ce point, on diminue les intensités objectives des deux sources dans la même rapport $af \div ac$, l'intensité de la sensation pour la radiation jaune représentée par ef devient plus faible que celle de la radiation violette représentée par $εf$. L'effet est inversé si l'on augmente l'intensité objective à partir de c , dans la même rapport $ad \div ac$: la sensation à la radiation jaune, représentée par dg devient plus forte que la sensation à la radiation violette, représentée par $dγ$.

Helmholtz explique que, sous une forte intensité d'éclairage, ce sont les couleurs les moins réfrangibles⁶¹, telles que le jaune et le rouge, qui apparaissent avec le plus de force tandis que, si l'éclairage est peu intense, les

61. Les moins déviées à la traversée d'un prisme.

couleurs les plus réfrangibles, telles que le bleu et le violet, fournissent la sensation la plus intense⁶². La situation créée par le phénomène de Purkyně pour les mesures photométriques est exprimée ainsi par Helmholtz :

Il résulte de là qu'il est impossible d'établir, pour différentes sortes de lumière chromatique, des unités telles que des quantités de deux lumières qui sont égales par rapport à ces unités soient aussi toujours senties avec la même intensité. Loin de là, les fonctions qui expriment le rapport entre l'intensité de la sensation et celle de la lumière objective sont différentes pour des intensités diverses des lumières de différentes couleurs.⁶³

En d'autres termes, une valeur exprimant qu'une source lumineuse d'une couleur donnée est plus intense qu'une source de référence d'une autre couleur est dépourvue de signification puisque cette valeur dépend des conditions selon lesquelles est effectuée la comparaison. L'effet Purkyně, effet éminemment physiologique, empêche une comparaison photométrique indiscutable des lumières de couleurs différentes. Il semble rendre illusoire les efforts de création d'une métrologie photométrique ! Le défi qu'il soulève en cette seconde partie du siècle mobilise forcément les trois disciplines : photométrie, psychologie, physiologie. Cette histoire du croisement entre les « trois P », des collaborations scientifiques en France, comme celle de Macé de Lépinay et de Nicati, de Crova et de Lagarde qu'il a occasionnées a été, jusqu'à présent, peu renseignée. Elle motive ici une attention particulière que justifie cette remarque formulée en 1881 par les deux chercheurs de Marseille :

L'étude complète de ces variations, ou, ce qui revient au même, l'étude complète du phénomène de Purkinje, devait nécessairement précéder l'étude comparative de divers observateurs.⁶⁴

Une bonne part de leurs recherches sur la « comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre » sera consacrée à mesurer la portée de l'effet Purkyně dans les évaluations photométriques des sources colorées. C'est sans doute ce qui constitue la nouveauté de ces nouvelles recherches, par rapport aux travaux antérieurs et une originalité vis à vis de travaux postérieurs, consacrés à ces comparaisons, comme ceux d'Abney (William de

62. En langage moderne, l'effet Purkyně, spécifique de la vision humaine, désigne le fait que la vision des couleurs dépend du niveau de luminosité. Quand l'œil passe ainsi de la vision *photopique* (forte luminosité) à la vision *mésopique* (faible luminosité), le maximum de sensibilité se déplace vers les courtes longueurs d'onde, c'est à dire vers le bleu.

63. H. von Helmholtz, *ibid.*, p. 422.

64. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, Mémoire de 1881 [MdLN81], p. 294-295.

Wiveleslie Abney, 1843-1920) ou de Samuel Pierpont Langley (1834-1906) (infra, section 4.8).

4.4 Méthode de l'acuité visuelle

L'acuité visuelle mesure la faculté d'un œil normal de distinguer les objets, d'en percevoir les détails. Elle se manifeste en particulier dans le déchiffrement des caractères imprimés. Or c'est un fait bien connu que, si l'on illumine une page imprimée par une lumière de couleur quelconque, la facilité à lire les caractères diminue lorsque l'éclairage s'affaiblit. L'acuité visuelle diminue en même temps que l'intensité lumineuse, perçue par l'observateur. Dès lors, apprécier l'égalité de deux lumières peut se ramener à évaluer l'acuité visuelle lorsque l'œil est soumis à chacune de ces intensités lumineuses. Macé de Lépinay et Nicati précisent :

Nous pourrions donc considérer deux quantités de lumière comme égales entre elles lorsque, éclairant un même objet incolore (c'est à dire noir sur fond blanc), placé toujours à la même distance du même observateur, elles lui font percevoir les détails avec la même netteté, ou, en d'autres termes, lorsqu'elles ramènent l'acuité visuelle à la même valeur.⁶⁵

La mesure de l'acuité visuelle utilise un motif alternant des parties noires sur un fond blanc, appelé « optotype » et placé à une distance connue du sujet. L'acuité visuelle est définie par l'inverse de l'angle, exprimé en minutes, sous lequel l'observateur parvient à distinguer deux zones noires consécutives, à cette distance. Un angle $\alpha = 1'$ correspond à une acuité $V = 1$, soit « dix dixièmes » ; un angle $\alpha = 10'$ correspond à une acuité $V = 1/10$, soit « un dixième ». Si l'observateur posté à $D = 1$ m de l'optotype distingue deux traits noirs successifs, séparés de $d = 1$ mm, alors :

$$\alpha = \frac{d}{D} = 10^{-3} \text{ rad} = \frac{10^{-3} \times 180 \times 60}{\pi}, \quad (4.1)$$

soit $\alpha = 3,4377'$ et $V = \frac{1}{\alpha} = 0,29$. Pour une distance de n mètres, on aurait $V = 0,29 n$.⁶⁶

⁶⁵. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, Mémoire de 1883 [MdLN83a], p. 147.

⁶⁶. Inversement, si $d = 1$ mm, une acuité visuelle de 1 correspond à une distance

$$D = \frac{d}{\alpha} = \frac{10^{-3} \times 180 \times 60}{\pi} = 3,4377 \text{ m}. \quad (4.2)$$

Les différentes équipes qui ont étudié, à cette époque, la distribution de la lumière dans le spectre solaire ont placé à la vue des observateurs des « testobjets » assez divers. À Montpellier, Crova et Lagarde vont utiliser « une lame de verre sur laquelle est photographiée une division à traits très fins et très rapprochés ». La plaque est collée à la fente du spectroscope, la direction des stries étant perpendiculaire à l'axe de la fente. « On observe ainsi un spectre pur, sillonné d'un nombre considérable de stries longitudinales très fines »⁶⁷. Dans une étude, un peu plus tardive, publiée en 1889, Langley, astronome de l'observatoire d'Allegheny aux États-Unis, fait déchiffrer à trois de ses collaborateurs (désignés, selon l'usage par leurs initiales, P. W. V., B. E. L. et E. M.)⁶⁸ les caractères imprimés d'un fragment d'une table de logarithmes⁶⁹. À Marseille, les ambitions de Macé de Lépinay et de Nicati veulent dépasser la simple caractérisation du spectre en terme d'intensité : il s'agit aussi d'élargir la somme des données propres à la vision des couleurs, en particulier pour ce qui concerne les variations de l'acuité visuelle, dans les différentes régions du spectre, en fonction de l'intensité lumineuse. Le testobjet est donc défini selon des critères stricts. Aux lettres traditionnelles

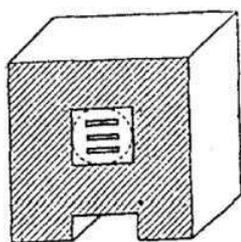


fig. 4.6 – Le motif utilisé par Macé de Lépinay et Nicati. Quand le cube est placé dans la lumière spectrale, grâce à une règle munie de cannelures, seule est visible la lumière diffusée par le carré blanc entourant le signe et qui correspond à la longueur d'onde déterminée sur la règle. On remarque l'échancrure qui permet le positionnement du cube sur la règle. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, mémoire de 1881 [MdLN81], p. 310, fig. 6.

est substitué un signe formé de trois traits noirs, horizontaux de longueur 5 mm, d'épaisseur 1 mm et séparés l'un de l'autre par 1 mm. L'obtention d'un noir absolu se fait par découpage de trois fentes sur un papier blanchi à la céruse, fixé sur la face antérieure d'un cube de bois noirci dont l'arête mesure

67. André Crova, Charles-Jacques-Henri Lagarde, « Détermination du pouvoir éclairant des radiations simples », *CRAS*, 1881, tome 93, p. 960.

68. La vue des observateurs n'est pas exempte de défauts mais elle est en principe corrigée : S.P.L., il s'agit de Langley, est un peu presbyte, P. W. V. est myope, B. E. L. est aussi myope et E. M. est un jeune garçon de quinze ans à la vue réputée irréprochable.

69. S. P. Langley, « Energy and vision », *Phil. Mag.*, 1889, ser. 5, vol. 27, p. 1-23.

3 cm. Le papier couvre un trou cylindrique de diamètre 1 cm dont la paroi intérieure et le fond sont aussi noircis. Le spectre étant projeté sur une bande de velours noir qui l'absorbe totalement, l'observateur ne voit que le motif dans la lumière spectrale, diffusée par le carré blanc.

La description du montage expérimental conçu par Macé de Lépinay et Nicati donne une bonne idée de la méthode et des instruments utilisés dans les laboratoires, tels que ceux cités plus haut, impliqués dans cette thématique. Un « porte-lumière »⁷⁰ conduit la lumière solaire vers le collimateur d'un spectroscopie à prisme⁷¹. La lunette en a été ôtée afin de projeter le spectre sur l'écran noir, situé à deux mètres de l'appareil. Le spectre doit être d'une largeur suffisante (30 cm) pour montrer toutes les raies d'absorption, telles qu'elles ont été repérées par Fraunhofer, entre C (dans le rouge) et G (dans le violet). Leurs longueurs d'onde connues permettront d'étalonner le dispositif, c'est-à-dire d'établir la relation entre les distances mesurées sur le spectre, à partir de la raie C prise pour origine et les longueurs d'onde. Cette détermination se fait en utilisant la formule empirique suivante :

$$x = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \quad (4.3)$$

où x est la distance en centimètres, mesurée par rapport à la raie C, λ la longueur d'onde et a , b , c trois constantes que l'on peut calculer avec les longueurs d'onde connues des raies de Fraunhofer⁷².

Le réglage de l'intensité lumineuse est effectué en diaphragmant la lentille par une série d'ouvertures carrées de surfaces connues. La quantité de lumière est alors proportionnelle à la surface des trous. Dans toutes ces expériences,

70. L'instrument est un petit *héliostat* manuel, monté en général au travers du volet opacifié d'une fenêtre. Il possède un miroir orientable, placé à l'extérieur du laboratoire et manœuvrable de l'intérieur. Une description en est donnée par Jules Jamin et Edmond Bouty (1846-1922) dans leur *Cours de physique de l'École polytechnique*, Paris, Gauthier-Villars, 1879, tome 3, fasc. 2, p. 6-8.

71. Le collimateur constitué d'une fente et d'une lentille convergente permet de former l'image de la fente à l'infini et donc d'obtenir un faisceau de lumière parallèle pour illuminer le prisme.

72. La formule 4.3 émane de la relation de Cauchy (1789-1857), largement utilisée pour exprimer l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde. Dans le second mémoire d'octobre 1883, Macé de Lépinay et Nicati font état d'une autre relation empirique plus inhabituelle :

$$x = -6,80 - 1,58\lambda + \frac{13,278}{\lambda^2} + \frac{18,272}{\lambda^4}. \quad (4.4)$$

La question est abordée de façon détaillée par S. P. Langley dans « Experimental determination of Wave-Lengths in the invisible Prismatic Spectrum », *Memoirs of the National Academie of Sciences*, 1883, vol. 2, p. 155.

les mesures sont longues et fastidieuses. Pour rendre la procédure plus rapide et éviter la fatigue de l'œil, un système à glissière permet de remplacer rapidement une ouverture par une autre et de régler facilement la quantité de lumière. Comme le dispositif ne permet pas de faire varier de façon continue la quantité de lumière blanche, une interpolation linéaire est nécessaire pour trouver l'ouverture du diaphragme correspondant à une acuité visuelle donnée.

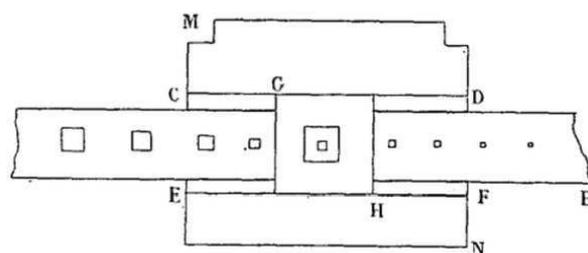


fig. 4.7 – Réglage et mesure de la quantité de lumière blanche. Le dispositif offre une série de neuf ouvertures dont les dimensions vont de 1 mm^2 à 100 mm^2 . L'intensité de lumière objective est proportionnelle à la surface des ouvertures. Dessin tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1881 [MdLN81], p. 308, fig. 3.

Pour traduire en nombres les résultats de leurs observations, Macé de Lépinay et Nicati définissent les « coefficients d'égale acuité » comme « les facteurs par lesquels il faudrait multiplier la quantité de lumière objective qui tombe en chacune des régions du spectre pour que, pour l'observateur considéré, l'acuité visuelle devînt la même dans toutes les parties de ce spectre. »⁷³ Ce préambule détermine le protocole expérimental : le motif est placé dans une zone du spectre, choisie comme région de référence⁷⁴. Par définition, le coefficient d'égale acuité (c.e.a.) pour cette région vaut 1. On mesure alors l'acuité visuelle pour cette région. Le pointé photométrique peut arriver à une précision de 2 à 3% si l'on suit le protocole détaillé par les deux auteurs : le motif étant placé dans la lumière spectrale, l'observateur s'éloigne à une distance telle qu'il ne puisse plus distinguer les traits horizontaux.

Si l'observateur se rapproche alors de l'objet d'un mouvement régulier, qui ne soit ni trop lent ni trop rapide, il arrive un instant

73. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, Mémoire de 1881 [MdLN81], p. 302.

74. En principe la région la plus lumineuse du spectre. Mais Macé de Lépinay et Nicati placeront en fait la région de comparaison autour de la longueur d'onde $0,496 \mu\text{m}$ (région du bleu-vert) car l'intensité perçue est alors intermédiaire entre son maximum et l'intensité la plus sombre.

où il commence à voir les trois barres se séparer nettement l'une de l'autre. Avec un peu d'habitude, en recommençant la même observation plusieurs fois de suite dans les mêmes conditions, on retrouve pour la valeur de la distance de l'observateur à l'objet, au moment où il commence à le distinguer, le même nombre, à 0,02 ou 0,03 près. Chaque observation est répétée du reste un certain nombre de fois, et l'on prend la moyenne des nombres obtenus.⁷⁵

Si l'on suppose alors que les traits deviennent discernables à une distance de l'observateur égale à 1,10 m, cela correspond à une acuité visuelle $V = 0,29 \times 1,10 \approx 0,33$.

Le motif étant ensuite déplacé dans une autre région du spectre, il faut déterminer dans quelle proportion l'intensité de la lumière reçue par le spectroscopie doit être modifiée pour que l'acuité visuelle prenne la même valeur, c'est-à-dire pour que la distance à laquelle le signe est discerné soit égale à celle du premier pointé, soit ici 1,10 m. Pour retrouver ainsi une acuité $V = 0,33$, on trouve que la surface du diaphragme a été réduite dans la proportion 0,792 : ce nombre représente le *coefficient d'égale acuité*, rapporté à la région de référence. On répète le pointé pour chacune des régions spectrales⁷⁶. Les séries de mesures sont renouvelées pour plusieurs acuités, l'observateur se plaçant à différentes distances du motif. En utilisant cette méthode, Macé de Lépinay et Nicati réalisent cinq séries de mesures pour cinq valeurs de l'acuité visuelle⁷⁷.

Il convient de s'interroger sur la valeur des nombres obtenus que le phénomène de Purkyně pourrait remettre en cause si les conditions d'éclairage étaient modifiées. Mais Macé de Lépinay et Nicati l'affirment : « Toute difficulté provenant du phénomène de Purkinje a bien disparu, car dire qu'en une région du spectre le coefficient d'égale clarté [ou acuité] est C revient à exprimer un simple fait expérimental. »⁷⁸ De fait, la mesure du coefficient d'égale acuité consiste seulement à mesurer, pour une radiation, un niveau d'éclairage pour atteindre une certaine acuité visuelle. Cette valeur est parfaitement mesurable pour chaque longueur d'onde du spectre visible et ne change pas tant que l'intensité commune à laquelle sont ramenées toutes les régions du spectre n'est pas modifiée. En revanche, si cette intensité commune

75. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, Mémoire de 1881 [MdLN81], p. 311.

76. Le signe est déplacé de 2 cm en 2 cm environ, ce qui autorise environ quinze pointés, sur toute l'étendue du spectre.

77. Les valeurs de l'acuité visuelle choisies sont 0,47, 0,42, 0,33, 0,26, 0,22.

78. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, « Recherches sur la comparaison photométrique des sources diversement colorées et en particulier sur la comparaison des diverses parties d'un même spectre », *Journal de Physique*, 1883, sér. 2, tome 2, p. 66.

est choisie de plus en plus faible, on devine que le coefficient d'égale acuité relatif au bleu doit diminuer et augmentera si, inversement, cette intensité est choisie plus élevée. C'est pourquoi Macé de Lépinay et Nicati avertissent :

Les coefficients ainsi définis ne sont point constants. Ils dépendent essentiellement, toutes les autres conditions restant les mêmes, de la clarté à laquelle a été amenée au préalable la radiation la plus intense du spectre.⁷⁹

Les valeurs brutes, obtenues sur le soleil de Marseille doivent subir plusieurs transformations avant toute interprétation. Comme l'expliquent Macé de Lépinay et Nicati, ces valeurs dépendent de la forme du spectre réalisé par l'appareil spectral. Ainsi des prismes n'ayant pas le même pouvoir dispersif conduiront-ils à des ensembles de coefficients différents. Cette difficulté disparaît si les valeurs sont ramenées à celles que l'on obtiendrait avec un spectre *normal*. On désigne ainsi un spectre tel que la distance entre deux raies quelconques est proportionnelle à la différence de leurs longueurs d'onde⁸⁰. Ce type de calcul, monnaie courante en spectrométrie où les prismes sont taillés dans des verres différents (*flint* ou *crown*), est expliqué dans le mémoire de 1881⁸¹. On trouve également cette transformation illustrée chez Langley, dans son étude des longueurs d'onde invisibles du spectre solaire⁸². Or les valeurs calculées pour le spectre normal conduisent à ceci :

Spectre normal.

Longueurs d'onde.	Coefficients d'égale acuité.
0,569.....	0,0422
0,520.....	0,134
0,496.....	1,000

fig. 4.8 – C.e.a. pour une acuité de 0,33 et pour les longueurs d'onde choisies pour l'intensité maximale. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, mémoire de 1881 [MdLN81], p. 320.

Les c.e.a. mesurés l'ont été en choisissant pour l'intensité de référence, (i.e, celle pour laquelle le c.e.a. est pris égal à l'unité) celle de la radiation

79. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, *ibid.*, p. 66.

80. Expérimentalement, le spectre de diffraction d'un réseau se rapproche d'un spectre normal.

81. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, Mémoire de 1881 [MdLN81], p. 316-320.

82. S. P. Langley, [Lan83], p. 159-162; voir également E. Mascart, *Traité d'Optique*, Paris, Gauthier-Villars, 1889, tome 1, p. 103-105.

de longueur d'onde $0,496 \mu m$. Comme la région la plus intense du spectre, qui doit servir de référence, se situe en fait à la longueur d'onde $0,569 \mu m$, il reste encore à diviser les c.e.a. dans le spectre normal par le c.e.a. provisoire $0,0422$ obtenu à cette fréquence. On obtient de cette façon les c.e.a. définitifs mais seulement pour l'acuité choisie, ici $V = 0,33$. Les c.e.a. définitifs, pour les différentes valeurs de l'acuité visuelle, sont rassemblés dans le tableau reproduit fig. 4.9.

TABLEAU III.

Coefficients d'égale acuité dans le spectre normal pour diverses valeurs de l'acuité visuelle.

Longueurs d'onde.	$V=0,47$.	$V=0,42$.	$V=0,33$.	$V=0,26$.	$V=0,22$.
$0,680\dots$	»	»	66,3	65,0	63,8
$0,640\dots$	8,92	9,39	9,01	9,01	8,50
$0,613\dots$	»	»	3,97	»	»
$0,589\dots$	1,30	»	1,30	1,29	»
$0,569\dots$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$0,550\dots$	1,07	1,10	1,05	1,03	»
$0,534\dots$	»	»	1,95	»	»
$0,520\dots$	3,16	3,16	3,19	3,35	3,22
$0,507\dots$	»	»	7,81	7,73	8,49
—————					
$0,496\dots$	38,8	32,9	23,7	19,0	16,6
$0,476\dots$	»	327	183	»	»
$0,458\dots$	»	1110	543	251	221
$0,442\dots$	»	4680	1920	828	711
$0,428\dots$	»	»	5460	2020	1610

fig. 4.9 – Coefficients d'égale acuité pour différentes acuités visuelles. Les valeurs élevées dans la région violette du spectre s'expliquent par le coefficient $\frac{1}{0,0422}$, infra, ramenant les valeurs mesurées à la radiation la plus intense de longueur d'onde $0,569 \mu m$. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, mémoire de 1881 [MdLN81], p. 321.

Les nombres obtenus indiquent que les coefficients d'égale acuité croissent de part et d'autre de la longueur d'onde $0,569 \mu m$ située dans la région jaune du spectre⁸³. Dans cette région, l'intensité perçue est donc à son maximum, fait qui avait déjà été constaté par Newton, Herschel et Fraunhofer et qui

83. Les auteurs précisent cependant que la position doit correspondre en fait à une

infirme les conclusions de Draper. Outre ce résultat attendu, l'examen des valeurs des coefficients d'égle acuité montre clairement l'existence de deux régions dans le spectre, que Macé de Lépinay et Nicati séparent par un trait : pour les longueurs d'onde comprises entre $0,680 \mu m$ (rouge extrême) et $0,507 \mu m$ (correspondant à la frontière entre le vert pur et le cyan ou vert teinté de bleu), les coefficients d'égle acuité restent sensiblement constants pour les différentes valeurs de l'acuité visuelle.

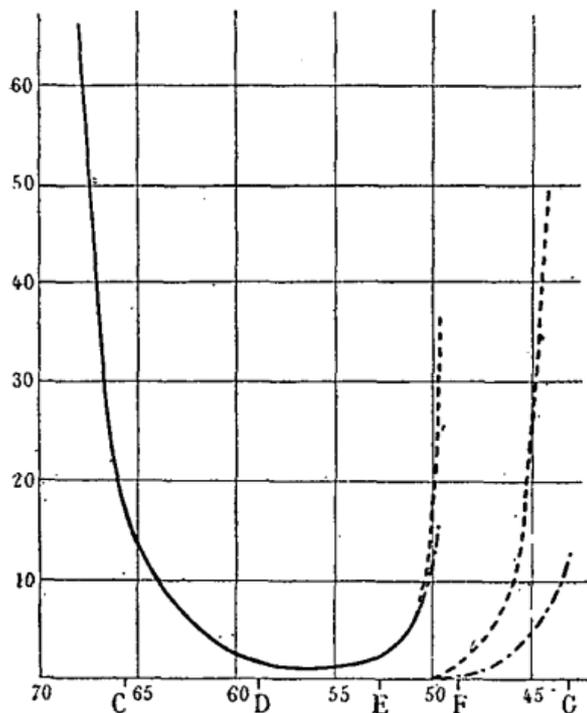


fig. 4.10 – Courbes des coefficients d'égle acuité en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de l'acuité visuelle V prise comme paramètre. Les abscisses (en centièmes de micromètre) s'échelonnent des radiations les moins réfrangibles (rouge) vers les plus réfrangibles (violet), telles qu'elles apparaissent de gauche à droite sur le spectre prismatique. Pour $\lambda < 0,507 \mu m$, les courbes ont été tracées avec une échelle 100 fois plus petite. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, *ibid.*, p.326.

En revanche, pour les radiations les plus réfrangibles (c'est à dire pour les longueurs d'onde inférieures à $0,507 \mu m$), les coefficients d'égle acuité décroissent au fur et à mesure que l'acuité visuelle choisie est plus faible, c'est à dire que l'éclairage est plus faible. La représentation graphique des c.e.a.

longueur d'onde un peu plus courte. Les études suivantes de Macé de Lépinay et Nicati conduiront effectivement à une valeur de l'ordre de $0,55 \mu m$.

montre que pour les longueurs d'onde supérieures à $0,507 \mu m$, les courbes correspondant aux différentes acuités sont superposées (trait plein). Pour les radiations les plus réfrangibles, au contraire, les courbes se séparent et se placent les unes en dessous des autres au fur et à mesure que l'acuité visuelle décroît (la courbe en traits discontinus correspond à $V = 0,42$, celle en traits mixtes à $V = 0,22$).

En d'autres termes, si l'on diminue l'intensité d'éclairage et donc l'acuité visuelle, le bleu et le violet paraissent de plus en plus lumineux. Inversement, si l'on augmente l'intensité d'éclairage, soit l'acuité visuelle, le bleu et le violet paraîtront de plus en plus sombres. Les résultats expérimentaux, obtenus par Macé de Lépinay et Nicati montrent de façon tangible l'existence du phénomène de Purkyně. Ils révèlent de plus que ce phénomène ne se produit de façon notable que pour les radiations les plus réfrangibles du spectre. En réponse à l'objection de Helmholtz, il devient donc possible d'effectuer la comparaison des intensités relatives, au moins pour les radiations les moins réfrangibles, comprises entre l'extrême rouge et le vert de longueur d'onde $\lambda = 0,507 \mu m$.

La moisson de données récoltées par Macé de Lépinay et Nicati leur permet de déterminer ensuite la relation entre l'acuité visuelle et l'intensité lumineuse objective, pour chaque radiation simple du spectre, question ayant déjà donné lieu à plusieurs recherches. Ils parviennent à la conclusion suivante :

L'acuité visuelle croît plus lentement et décroît plus lentement pour le bleu que pour les radiations moins réfrangibles, pour une même variation de l'intensité lumineuse objective, et cette différence est d'autant plus accentuée que l'on considère une radiation plus réfrangible à partir du vert.⁸⁴

Ils ne manquent pas de faire le rapprochement entre leurs résultats et la courbe imaginée par Helmholtz dans l'*Optique physiologique* (voir supra 4.5) représentant l'intensité de la sensation en fonction de l'intensité objective. Les courbes de Macé de Lépinay et Nicati montrent les mêmes variations pour l'acuité visuelle (la sensation) qui sont en concordance avec la description qu'ils ont donnée du phénomène de Purkyně.

84. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1881, p. 334.

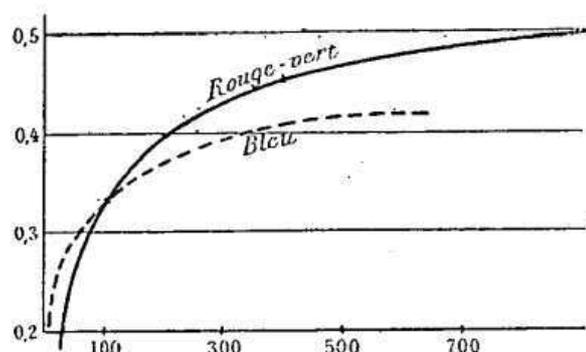


fig. 4.11 – Variation de l'acuité visuelle en fonction de l'intensité lumineuse objective. 100 représente la quantité de lumière jaune nécessaire pour obtenir la valeur $V = 0,33$ de l'acuité visuelle. La courbe en traits discontinus correspond à la radiation violette de longueur d'onde $\lambda = 0,442 \mu m$, la courbe en trait continu aux radiations les plus réfrangibles, rouges, jaunes et vertes. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, mémoire de 1881, p. 335.

4.5 La loi de Bouguer-Masson et l'effet Purkyně

Dans une note de 1882⁸⁵, Macé de Lépinay et Nicati publient les résultats des expérimentations qu'ils ont entreprises afin de préciser le domaine de validité de la loi de Bouguer-Masson. Si l'œil est amené à observer deux surfaces voisines, éclairées respectivement par les quantités de lumière Q et $Q + \Delta Q$, il cesse d'apprécier la différence d'éclairage des deux surfaces lorsque la différence ΔQ est une fraction constante de la quantité de lumière moyenne. Cette loi établie par Bouguer et précisée par Masson se formule ainsi :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{1}{n}$$

où n est une constante égale à 64 selon l'estimation de Bouguer (supra p. 41), valeur portée à 120 par Masson (supra p. 196). La loi avait été énoncée dans le cas de la lumière jaune, fournie par des bougies. Macé de Lépinay et Nicati se proposent de vérifier la validité de la loi pour les différentes radiations du spectre et de déterminer si la constante n est la même pour toutes ces radiations. Ils imaginent de comparer au moyen d'un photomètre de Rumford deux sources colorées, l'une verte (source de référence) et l'autre bleue (lumière tirée du spectre solaire). Lorsque les deux ombres paraissent

85. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, « Relation entre la loi de Bouguer-Masson et le phénomène de Purkinje », *CRAS*, 1882, tome 94, n° 12, p. 785-788.

également éclairées, on note Q la quantité de lumière verte et Q' la quantité de lumière bleue. Si, à partir de là, la quantité de lumière verte est augmentée de ΔQ il faut, pour rétablir l'égalité des ombres, augmenter la quantité de lumière bleue de $\Delta Q'$ et dans une proportion plus grande que pour la lumière verte, en raison du phénomène de Purkyně. L'on a :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = A \cdot \frac{\Delta Q'}{Q'} \quad (4.5)$$

où A est un nombre inférieur à 1. À supposer maintenant que ΔQ soit la plus petite différence perceptible, il en est de même pour $\Delta Q'$. Si la loi de Bouguer-Masson est exacte pour la lumière verte de comparaison et pour la lumière bleue du spectre, on peut écrire :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{1}{n}$$

et

$$\frac{\Delta Q'}{Q'} = \frac{1}{n'}$$

où n et n' sont des constantes qui correspondent à ce que les physiologistes allemands appellent la « sensibilité pour les différences ». La conséquence immédiate de ces relations est que : $n' = A \cdot n$. Comme A est inférieur à 1, n' est inférieur à n . Il en résulte que la sensibilité pour les différences est plus faible dans le bleu que dans le vert, toujours en raison du phénomène de Purkyně. Comme de plus ΔQ et $\Delta Q'$ peuvent être considérées comme des quantités différentielles, on trouve par intégration de l'équation 4.5⁸⁶ :

$$\ln(Q) = A \cdot \ln(Q') \quad (4.6)$$

La vérification expérimentale de la loi représentée par la formule 4.6 doit donc permettre de vérifier la généralité de la loi de Bouguer-Masson sur toute l'étendue du spectre. L'expérience consiste à faire varier, pour chaque région du spectre, la quantité de lumière spectrale en diaphragmant celle-ci et à déterminer, pour chaque point de mesure, la quantité de la lumière verte de comparaison pour obtenir l'égalité de clarté des ombres. Cette dernière quantité est réglée en déplaçant la source verte devant l'écran d'observation. Pour une région donnée du spectre, la valeur de A est déduite de deux points de mesures. Macé de Lépinay et Nicati effectuent treize séries de mesures entre les raies C et G du spectre solaire et ils peuvent vérifier la validité de la loi avec des écarts inférieurs à trois pour cent. De ces mesures sont tirées les valeurs des constantes A et n .

⁸⁶. La constante d'intégration est éliminée en prenant pour unité de lumière bleue celle qui donne une ombre de même clarté que la quantité de lumière verte prise pour unité, laquelle est comparée à la lumière d'une bougie stéarique placée à 2 m.

$10^5 \lambda = 6,23$	5,86	5,59	5,33	5,12	5,02	4,93	4,78
$A = 1,01$	0,99	1,01	0,99	1,00	0,95	0,94	0,93
$n = 64,6$	63,4	64,6	63,4	64,0	60,8	60,2	59,5
$10^5 \lambda = 4,66$	4,55	4,44	4,36	4,29	*	*	*
$A = 0,90$	0,87	0,87	0,84	0,85	*	*	*
$n = 57,6$	55,7	55,7	53,8	54,4	*	*	*

fig. 4.12 – Valeurs de la constante A et de la constante n dans les différentes régions du spectre. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, « Relation entre la loi de Bouguer-Masson et le phénomène de Purkinje », *CRAS*, 1882, tome 94, n° 12, p. 788.

À la lumière de ces résultats, on constate que pour la moitié la moins réfrangible du spectre, là où le phénomène de Purkyně ne se produit pas, la valeur de A reste constante et égale à 1. Inversement, A est inférieur à 1 dans la partie la plus réfrangible et diminue avec l'accentuation du phénomène de Purkyně. L'intensité de l'effet Purkyně peut donc se mesurer par la valeur de $1 - A$. En outre, la loi de Bouguer-Masson est vérifiée pour chacune des radiations simples du spectre. La constante n qui mesure la sensibilité aux différences reste la même pour les radiations les moins réfrangibles ($\lambda \geq 0,512\mu m$) et elle correspond à l'estimation de Bouguer (64). La valeur de la constante n décroît au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue. La sensibilité pour les différences est plus faible dans la moitié la plus réfrangible du spectre, en raison du phénomène de Purkyně.

4.6 Méthode de l'égalité des ombres

En octobre 1883, Macé de Lépinay et Nicati publient un second mémoire consacré à la comparaison photométrique des diverses radiations du spectre⁸⁷. Il s'agit dans leur idée de confronter les résultats obtenus par la méthode des acuités, deux ans auparavant, à ceux que fournira la méthode des « ombres égales ». Le physicien et l'ophtalmologiste soutiennent que les difficultés pour juger de l'égalité des clartés peuvent être contournées en « passivant » la sensation colorée.

L'expérience démontre que, quelques différentes que soient les colorations de ces deux plages contiguës, pourvu qu'elles soient assez petites, l'œil peut apprécier avec une certaine exactitude le mo-

87. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, « Recherches sur la comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre, deuxième mémoire », *ACP*, 1883, sér. 5, tome 30, (Mémoire de 1883 par la suite), p. 145-214.

ment où ces deux plages paraissent également éclairées, ou, en d'autres termes, le moment où elles présentent même clarté.⁸⁸

Si dans un photomètre de Rumford, la surface d'observation se trouve limitée à moins de 1 cm^2 , alors l'attribut de « clarté » de la lumière prédomine sur sa coloration et le pointé photométrique peut offrir une précision acceptable. L'étude se fera avec une tige « ombrante » de 1 mm d'épaisseur. Son ombre se projettera sur un petit écran blanc collé sur la face antérieure d'un cube de bois noirci qui pourra se positionner dans les différentes régions spectrales, grâce à la même règle cannelée que celle utilisée lors de l'étude précédente. Une fente large de 5 mm pratiquée dans un papier noir est collée sur l'écran blanc ; on peut la façonner avec la hauteur voulue, par exemple 8 mm pour les premières mesures. Tout ceci limite de façon drastique le champ d'observation. En approchant la tige de l'écran, on peut amener les deux ombres au contact. Macé de Lépinay et Nicati annoncent qu'avec ces dispositions, les mesures sont parfaitement reproductibles, avec des écarts entre les nombres obtenus à des époques différentes ne dépassant pas $1/30$.

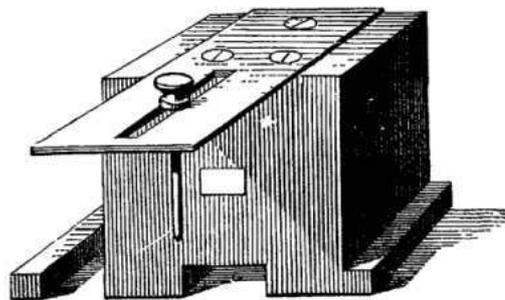


fig. 4.13 – La tige « ombrante » et son support, utilisée dans la méthode des ombres égales. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883 [MdLN83a], p. 159.

Pour traduire en nombres les observations que donnera la méthode des ombres égales, dans les différentes parties du spectre, Macé de Lépinay et Nicati vont définir cette fois les « coefficients d'égale clarté » :

Soit un spectre dans lequel la clarté maximum a une valeur donnée : *nous appelons coefficient d'égale clarté, pour une région donnée du spectre, le nombre qui exprime dans quelle proportion nous devons augmenter la quantité de lumière blanche productrice*

88. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, Mémoire de 1883, p. 148.

*du spectre, pour obtenir la même clarté que celle que possédait primitivement la région la plus intense du spectre.*⁸⁹

Cette définition revient à attribuer la valeur 1 au coefficient d'égalité de clarté de la région la plus intense du spectre. Elle implique également d'évaluer la quantité de lumière solaire qui produit le spectre. Celle-ci est simplement proportionnelle à la surface S du diaphragme interposé entre le porte-lumière et le spectroscope. Il faut disposer aussi d'une source auxiliaire dont l'intensité définit la clarté commune à laquelle doivent être ramenées toutes les régions du spectre. Macé de Lépinay et Nicati choisissent une source émettant dans la région moyenne du spectre, dans le jaune-vert, autour de $\lambda = 0,561\mu m$. Leur choix se porte sur une lampe à modérateur dont la cheminée, à hauteur de la flamme comprend une ouverture fermée par un verre coloré. La différence de coloration des ombres formées par chaque lumière spectrale et la lumière auxiliaire se trouve ainsi réduite ce qui permet une évaluation plus précise de l'égalité des clartés. Pour chaque expérience, la source auxiliaire est comparée à une source de référence, en l'occurrence une bougie stéarique placée à 2 m de distance, elle-même comparée à l'étalon Carcel : en posant 1 la quantité de lumière de l'étalon Carcel à 1 m de distance et sachant que 1 bougie = 0,1056 carcel, la quantité de lumière de la bougie placée à 2 m vaut $Q = 0,0264$ (Cette dernière valeur peut être prise pour unité par la suite.)⁹⁰

Dès lors, la marche d'une expérience est la suivante : la tige *ombrante* est introduite dans une région donnée N du spectre, ce qui produit une première ombre sur l'écran. Une source lumineuse de référence illumine l'écran d'une quantité de lumière égale à l'unité, ce qui produit aussi une ombre. L'égalité des ombres s'obtient en diaphragmant la lumière solaire, productrice du spectre, ce qui correspond à une quantité Q_1 . Immédiatement après, la tige ombrante est placée dans la partie M la plus lumineuse du spectre. L'égalisation visuelle fournit alors une nouvelle quantité Q_2 . Si on appelle S_1 et S_2 les surfaces du diaphragme utilisées pour réaliser les égalités des ombres, le coefficient d'égalité de clarté (c.e.c.) est défini par le rapport :

$$C = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{S_1}{S_2} \quad (4.7)$$

Simple dans son principe, la méthode soulève pourtant plusieurs difficultés inhérentes au jugement de l'observateur et aussi à la physiologie de la vision.

89. J. Macé de Lépinay, W. Nicati, Mémoire de 1883 [MdLN83a], p. 150.

90. Macé de Lépinay et Nicati expliquent l'impossibilité d'utiliser directement l'étalon Carcel car il aurait fallu déplacer l'étalon à une distance incompatible avec les dimensions de leur laboratoire. Pour ces mesures, les deux chercheurs ont utilisé les services du laboratoire de la Compagnie du gaz de Marseille, collaboration qu'il est intéressant de souligner.

Le premier achoppement est lié au phénomène de « contraste simultané » : en plaçant deux ombres colorées dans des positions contiguës, on exagère par contraste leur couleur. Si l'on observe ainsi les deux ombres formées respectivement par une bougie et par la lumière du jour, l'ombre de la lumière naturelle éclairée par la bougie apparaît jaune-rouge, tandis que l'ombre de la bougie éclairée par la lumière du jour, dont la couleur est blanche, apparaît teintée de bleu. Si le phénomène était dû à une altération de la sensation, deux quantités de lumières rouge et bleue, égales séparément à une troisième lumière, ne pourraient être égales entre elles en raison des différences dans les phénomènes de contraste. Selon Helmholtz, le contraste simultané correspond à une simple erreur de jugement et, dans ce cas, la comparaison devient possible⁹¹. Macé de Lépinay et Nicati vont vérifier par l'expérience que deux éclats lumineux, par exemple rouge et vert, égaux à une troisième lumière (blanche) sont aussi égaux entre eux⁹². Ils en déduisent que « les phénomènes de contraste simultané n'apportent aucune perturbation dans les expériences de comparaison de sources de couleurs différentes. »⁹³

Une autre difficulté se présente que Macé de Lépinay et Nicati vont signaler comme liée à la structure de la rétine : la partie centrale de cette dernière est teintée de jaune et il en résulte une sensibilité plus faible pour les radiations bleues. L'influence de ce qui est appelé le « scotome central » se manifeste de la façon suivante : supposons que soit obtenue l'égalité d'éclairément pour les deux ombres colorées, l'une verte et l'autre bleue, d'une tige de petite dimension. Si l'œil se rapproche de l'écran, l'ombre bleue devient plus brillante car est sollicitée une partie plus étendue de la rétine, donc plus sensible au bleu. Inversement, si l'observateur s'éloigne, l'ombre bleue devient moins lumineuse car c'est une zone plus petite et centrale de la rétine qui est impressionnée. Ainsi, la comparaison de deux lumières dépend de la grandeur des images : le coefficient d'égalité de clarté doit augmenter lorsque l'image rétinienne diminue et décroître dans le cas contraire. Ce fait impose donc d'indiquer, pour toute expérience de comparaison, les dimensions des ombres et la distance de l'observateur à l'écran. Les mesures des coefficients d'égalité de clarté pour différentes hauteurs de la tige ombrante, choisies entre 8 mm et 1 mm permettent à Macé de Lépinay et à Nicati de constater que

91. H. von Helmholtz, *Optique physiologique*, tome 1, p. 510-518.

92. En appelant R' l'intensité apparente d'une source colorée rouge, comparée à une autre source colorée, verte par exemple, et R l'intensité de cette même source rouge, comparée à une source blanche de même intensité que la source verte, Macé de Lépinay et Nicati trouvent pour le rapport R'/R une valeur de 1,004. Les rapports obtenus pour d'autres couples de lumières sont tous voisins de 1. Voir J. Macé de Lépinay et W. Nicati, *Mémoire de 1883*, p. 152-153.

93. Macé de Lépinay et Nicati, *Mémoire de 1883* [MdLN83a], p. 153.

les c.e.c. deviennent constants pour peu que la surface de l'image atteigne un certain degré de petitesse qui correspond, selon leur estimation, à une ouverture angulaire d'environ 45' du cône sous lequel est aperçue l'ombre de la tige⁹⁴.

Coefficients d'égalité de clarté dans le spectre normal.

λ .	$h = 0^m,008$.	$h = 0^m,004$.	$h = 0^m,002$.	$h = 0^m,001$.
0,670....	56,47	42,64	44,15	44,51
0,625....	4,170	3,287	3,379	3,432
0,589....	1,435	1,319	1,290	1,339
0,561....	1,028	1,038	1,015	1,015
0,537....	1,031	1,013	1,085	1,115
0,517....	1,617	1,737	1,915	1,951
0,500....	4,161	4,993	5,429	5,262
0,485....	9,093	11,86	"	12,26
0,471....	13,58	17,88	20,98	21,02
0,459....	24,82	"	"	41,36
0,449....	36,09	47,14	58,66	59,16
0,439....	56,09	"	"	86,57
0,430....	90,29	118,0	150,2	140,7

fig. 4.14 – Valeurs des Coefficients d'égalité de clarté pour différentes hauteurs du spectre. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, mémoire de 1883 [MdLN83a], p. 186.

Les mesures des c.e.c., précisent Macé de Lépinay et Nicati, se sont faites pour une distance de l'observateur $D = 0,16$ m, valeur étonnement faible en regard de la distance minimale de vision distincte qui est en moyenne de 25 cm pour un œil normal. Ce facteur a certainement contribué à la difficulté des expériences, en allongeant la durée des mesures par une nécessaire et régulière mise au repos de l'œil.

La répartition de la luminosité (la sensation ici) dans le spectre normal peut se déduire des coefficients d'égalité de clarté mais par deux calculs différents, selon le domaine de longueurs d'onde. Pour $\lambda > 0,507\mu\text{m}$, l'effet Purkyně ne se manifeste pas, toutes les radiations sont comparables entre elles et « l'intensité rapportée à l'intensité maximum prise pour unité, est donnée

94. Plus précisément 43' pour une hauteur de l'ombre de 2 mm et un observateur placé à 0,16 m de distance, Macé de Lépinay et Nicati, Mémoire de 1883, p. 189-190.

simplement par l'inverse du coefficient d'égalité de clarté. »⁹⁵ Pour les radiations les plus réfrangibles, c'est un peu plus compliqué car l'intensité dépend du nombre $A < 1$ qui quantifie l'incidence de l'effet Purkyně sur la sensation (supra p. 241). Soit le spectre normal pour lequel la clarté maximum a pour valeur 1. Supposons que dans la région bleue de ce spectre, le coefficient d'égalité de clarté soit C . Par définition, la quantité de lumière bleue reçue dans cette région est

$$Q' = \frac{1}{C}$$

car il suffit de la faire croître d'un rapport égal à C pour obtenir la clarté maximum. Mais il faut ramener les valeurs d'intensité de toutes les régions du spectre à l'intensité maximale correspondant à la région jaune. Or les quantités Q de lumière jaune et Q' de lumière bleue qui produisent la même sensation de clarté sont reliées par la relation

$$\ln(Q) = A \cdot \ln(Q')$$

où $A < 1$. Pour les radiations les plus réfrangibles, l'intensité lumineuse Q , dans la région du spectre où le coefficient d'égalité de clarté vaut C est :

$$\ln(Q) = A \cdot \ln\left(\frac{1}{C}\right) \tag{4.8}$$

Les nombres de l'intensité peuvent être portés en ordonnées sur un graphique dont les abscisses sont les longueurs d'onde en micromètres. Les valeurs sont ramenées à une intensité maximale de 1000 que Macé de Lépinay et Nicati situent à la longueur d'onde $\lambda = 0,555 \mu m$. Elle est légèrement décalée par rapport à la position du maximum, obtenue par la méthode des acuités égales ($\lambda = 0,569 \mu m$). Est ainsi vérifié une seconde fois que la sensation lumineuse se révèle la plus intense entre la région jaune et la région verte du spectre, contrairement aux affirmations de Draper qui avait placé ce maximum dans le rouge, pour le spectre prismatique. Macé de Lépinay et Nicati évaluent également, pour ces déterminations, une taille des images rétiniennes $< 0,2 \text{ mm}$. Il était pour eux important de vérifier ce paramètre pour le comparer à la taille des images rétiniennes du motif utilisé par la méthode des acuités égales. Pour cette dernière méthode, le motif de 5 mm de côté était observé à une distance de 1,10 m, ce qui correspond à une étendue de l'image rétinienne de 0,075 mm.

95. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883, p. 192.

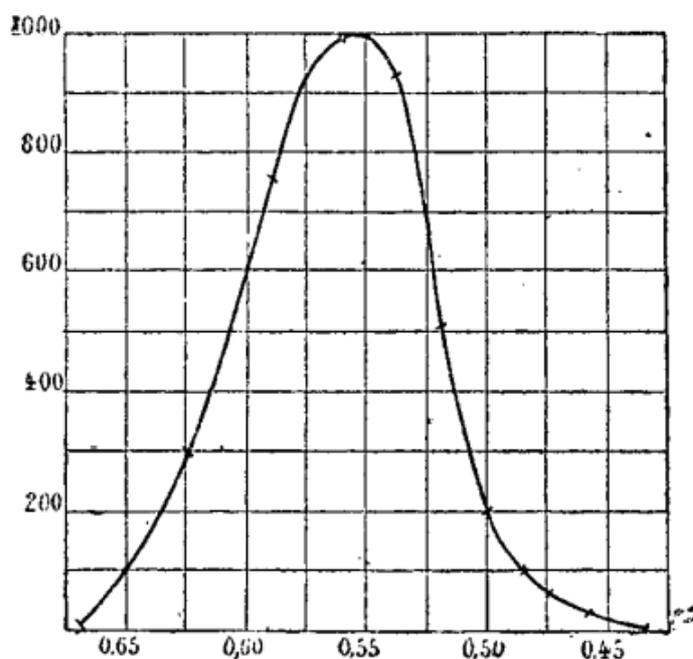


fig. 4.15 – Intensité lumineuse, ou « pouvoir éclairant », dans le spectre solaire. Le maximum correspond à $\lambda = 0,555\mu m$. Les abscisses sont orientées vers la droite, dans le sens des longueurs d'onde décroissantes (les rayons les plus réfrangibles sont le plus à droite dans le spectre). Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883, p. 195.

4.7 Confrontation des deux méthodes : acuités visuelles égales et clartés égales

Il reste à vérifier la concordance des résultats obtenus par la méthode des clartés égales et par celle des acuités visuelles égales. Il convient également de les mettre en perspective avec les estimations plus tardives d'autres auteurs. Pour une comparaison plus pertinente des nombres obtenus par les deux procédés, Macé de Lépinay et Nicati jugent nécessaires de nouvelles estimations des coefficients d'égale acuité, dans la mesure où les conditions d'observation ont été modifiées entre la campagne de 1881 et celle de 1883.⁹⁶

La comparaison des coefficients d'égale clarté (méthode des ombres) avec les nouvelles mesures des coefficients d'égale acuité montrent l'existence de deux régions spectrales (4.16). Pour les radiations les moins réfrangibles

96. Ces différences concernent les régions du spectre où les mesures ont été effectuées, le blanchiment de l'écran d'observation (blanchi à la céruse dans un cas, au sulfate de baryte dans l'autre), enfin l'appareil spectroscopique. Macé de Lépinay et Nicati ne veulent pas non plus négliger les modifications éventuelles que l'œil de chaque observateur aurait pu subir à deux ans d'intervalle.

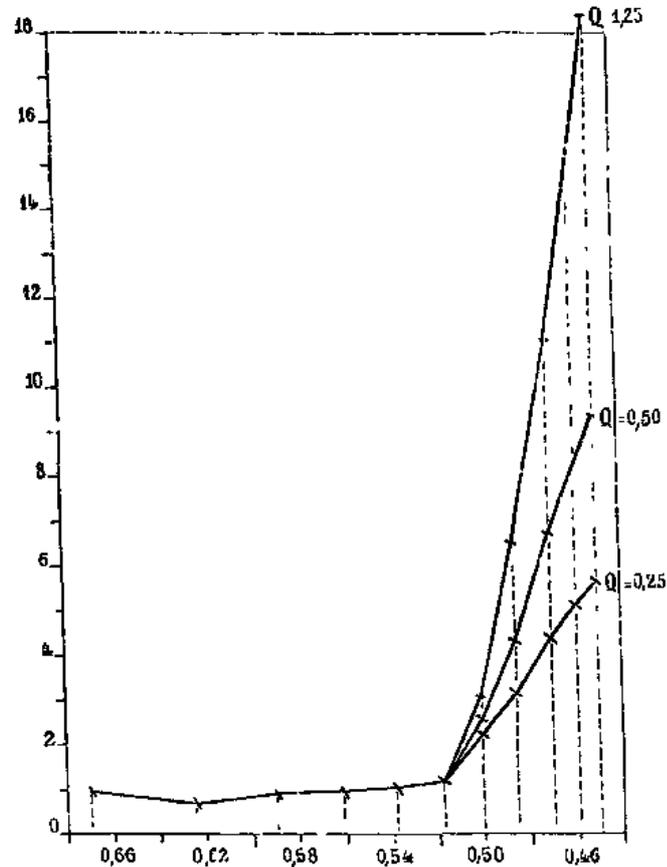


fig. 4.16 – Rapport $\frac{C.e.a.}{C.e.c.}$ sur l'étendue du spectre solaire, pour différentes conditions d'éclairage. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, *Journal de physique*, 1883, sér. 2, tome 2, p. 74.

(rouge-orange-jaune-vert) qui correspondent aux longueurs d'onde supérieures à $\lambda = 0,517 \mu m$ (selon l'estimation de Macé de Lépinay et de Nicati) les valeurs des c.e.a restent très voisines de celles des c.e.c, avec un rapport $\frac{c.e.a}{c.e.c}$ proche de 1. En revanche, pour les rayons les plus réfringibles ($\lambda \leq 0,517 \mu m$), les c.e.a. atteignent des valeurs cinq à six fois plus grandes que les c.e.c.

En d'autres termes, si l'on compare deux radiations, l'une jaune, l'autre bleue, de longueur d'onde $0^{\mu},460$ par exemple, et qu'on les amène à l'égalité de clarté, la quantité de lumière bleue est tout à fait insuffisante pour permettre de distinguer les objets aussi bien qu'avec cette lumière jaune, et il nous faudra, pour obtenir

une distinction également facile, employer environ cinq fois plus de lumière bleue.⁹⁷

Le graphique montre aussi que le rapport est encore plus grand si l'éclairage Q est augmenté de la valeur $Q = 0,25$ jusqu'à $Q = 1,25$. La quantité de lumière Q correspond à la clarté maximum, mesurée dans la région jaune du spectre, là où la longueur d'onde est annoncée égale à $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$. L'unité de quantité de lumière est celle émise par l'étalon Carcel, placée à 6,15 m de l'écran.

Les nombres obtenus permettent aussi à Macé de Lépinay et Nicati de quantifier l'effet Purkyně pour la méthode des acuités égales, par la valeur de l'expression $1 - B$ où B est un nombre inférieur à 1. La comparaison avec le nombre A correspondant à la méthode des clartés égales montre que les variations sur l'étendue du spectre sont plus intenses dans la méthode des acuités visuelles que dans celle des clartés égales.

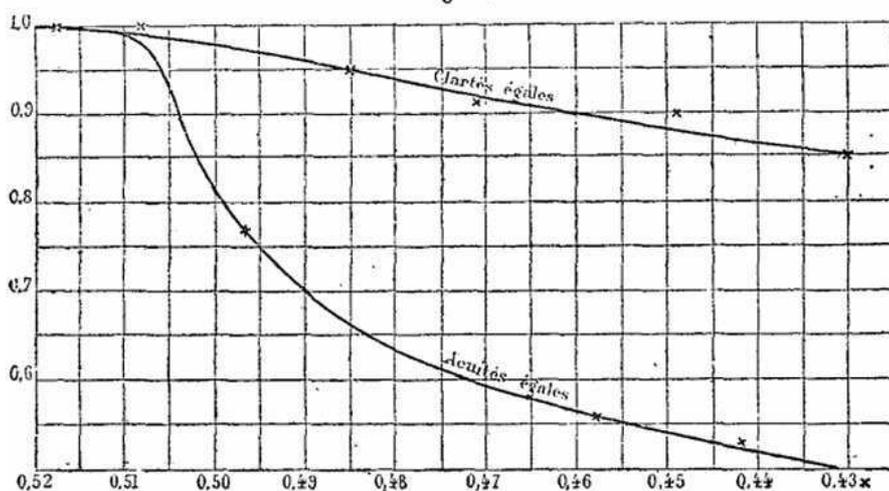


fig. 4.17 – Comparaison des nombres A (clartés égales) et B (acuités égales). Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883, p. 204.

Les deux Marseillais peuvent ainsi énoncer la loi suivante :

Le phénomène de Purkinje, tel qu'il ressort des expériences fondées sur l'acuité visuelle, se produit avec une intensité de beaucoup supérieure à celle avec laquelle il se manifeste dans les expériences fondées sur les clartés égales. En d'autres termes, les coefficients d'égale acuité augmentent et diminuent beaucoup plus

97. Macé de Lépinay, Nicati, Mémoire de 1883 [MdLN83a], p. 202.

*rapidement que les coefficients d'égale clarté pour une même variation de l'intensité objective (clarté) du jaune.*⁹⁸

Les résultats rassemblés par Macé de Lépinay et Nicati expriment la complexité du processus d'observation des sources colorées. En particulier, le fait que les méthodes des clartés égales et des acuités égales conduisent à des résultats différents vers les courtes longueurs d'onde ($\lambda \leq 0,517 \mu m$) est interprété par les deux savants comme un phénomène d'ordre physiologique :

Nous voulons dire par ce qui précède que le phénomène de Purkinje, ainsi que la grande inégalité dans le bleu des deux coefficients seraient deux propriétés spéciales aux éléments percepteurs du bleu.⁹⁹

Cette interprétation, il est intéressant de le souligner, semble admise aujourd'hui, et peut être rapproché de ce qu'écrit Yves Le Grand (1908-1986) : « Il en résulterait que chez les sujets normaux l'effet Purkinje serait facilité par les cônes bleus. »¹⁰⁰

Si le rôle prêté aux cônes bleus¹⁰¹ peut expliquer les différences observées aux courtes longueurs d'onde, les deux auteurs doivent cependant reconnaître la divergence entre leurs nombres et ceux des études antérieures de Fraunhofer et de Vierordt. Les écarts sont également notables avec les résultats de l'étude menée concurremment par Crova et Lagarde et publiés en 1882 dans le *Journal de physique*¹⁰². Les deux physiciens de Montpellier se sont consacrés à la mesure du pouvoir éclairant du Soleil et de l'étalon Carcel. Le procédé utilisé par Crova et Lagarde est, une nouvelle fois, fondé sur la capacité de l'oeil à distinguer les petits détails, dans différents domaines de longueurs d'onde. Le motif est une division de traits fins et rapprochés. Un système polarisant, formé de deux prismes de Nicol dont l'un est fixe et l'autre mobile sur un cercle gradué, assure le réglage de l'intensité. On peut ajuster assez précisément l'intensité de l'éclairage à la limite entre la disparition et l'apparition des stries.

98. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, *Mémoire de 1883* [MdLN83a], p. 205.

99. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, *Mémoire de 1883* [MdLN83a], p. 206.

100. Yves Le Grand, *Optique physiologique*, tome 2, *Lumière et couleur*, Paris, Masson, 1972, p. 282.

101. Le nombre de cônes bleus, ou « S » (pour *short* selon la terminologie officielle, actuelle), sur la fovéa est très inférieur à celui des cônes « M » (*medium*) et des cônes « L » (*large*).

102. A. Crova, C.J.H. Lagarde, « Détermination du pouvoir éclairant des radiations simples », *Journal de physique théorique et appliquée*, 1882, 1/1, p. 162-169.

TABLEAU XII.

Raies du spectre:	Fraunhofer ⁽¹⁾ .	Vierordt ⁽²⁾ .	M. et N ⁽³⁾ .	Crova ⁽⁴⁾ .	M. et N ⁽⁵⁾ .
C	61	80	80	28,6	61
D	576	696	768	451	760
E	603	462	400	218	720

fig. 4.18 – Comparaison des intensités obtenues par différents observateurs et par différentes méthodes :

- (1) clartés égales ;
- (2) loi de Bouguer-Masson généralisée ;
- (3) acuités visuelles égales ;
- (4) acuités visuelles égales ;
- (5) clartés égales par interpolation.

Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883, p. 204.

Les différences entre les estimations de différents observateurs dont l'équipe Crova-Lagarde et le binôme Macé de Lépinay-Nicati, notées dans le mémoire de 1883 pour les raies *fraunhoferiennes* C, D et E, expliquent la perplexité des deux derniers auteurs et leur conclusion désenchantée :

(...) le problème de la recherche de la distribution de la lumière dans le spectre est tout aussi difficile, sinon insoluble, que celui de la distribution de la chaleur dans ce même spectre, problème souvent abordé également, sans que jamais deux observateurs différents soient parvenus à des nombres concordants. ¹⁰³

Pour Macé de Lépinay et Nicati, une explication des écarts observés, notamment avec l'étude de Crova et de Lagarde, réside dans les phénomènes d'absorption de la lumière par les milieux traversés ¹⁰⁴. La répartition du rayonnement dans le spectre en serait modifiée dans des proportions inconnues.

La confrontation des données recueillies par les auteurs cités montre clairement la difficulté à comparer photométriquement des sources diversement colorées. En conclusion de leur étude, dans le chapitre VIII du mémoire de

103. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883 [MdLN83a], p. 197.

104. En particulier par le baume du Canada, utilisé pour coller les prismes dans le spectroscopie à vision directe. Pourtant, dans une publication de 1883 (*ACP*, 1883, 26/5, p. 557-558), Crova signale les inconvénients du prisme à vision directe (absorption intense dans le bleu et le violet, altération du baume utilisé pour le collage des prismes). Dans leur publication de 1882, Crova et Lagarde ne signalent pas avoir utilisé un prisme à vision directe.

1883, sous le titre « De la photométrie hétérochrome », Macé de Lépinay et Nicati exposent les principes qui doivent déterminer, en l'état actuel des recherches, les conditions de comparaison photométrique des sources lumineuses diversement colorées. Leur méthode demande la connaissance préalable de plusieurs données visuelles, en particulier les moyennes des valeurs des coefficients d'égalité de clarté, obtenues par plusieurs observateurs, mais aussi celles des coefficients d'égalité de acuité, en raison des écarts notables, observés entre ces deux coefficients. Dans le cas des sources employées pour l'éclairage ordinaire, qui utilisent l'incandescence de corps solides, les variations des coefficients en fonction de la température optique doivent aussi être connues. Dans le mémoire de 1881, Macé de Lépinay et Nicati avaient déjà averti de la différence significative que pouvaient présenter, à certaines longueurs d'onde, les coefficients c.e.a. et c.e.c., en raison du non-achromatisme de l'œil. Une question alors se pose : la méthode des « acuités égales » et celle des « ombres égales » peuvent-elles conduire à des résultats identiques, aux incertitudes inhérentes à chacune d'elle près et si non, quelle est des deux celle conduisant aux résultats les plus acceptables ? La discussion initiée par les deux auteurs, à la fin du mémoire, révèle bien la difficulté d'y répondre dans les premières années de cette décennie. Pour autant, certaines conséquences pratiques se font jour comme celle-ci : « La distinction nette des objets est presque exclusivement due à l'éclairage produit par la moitié la moins réfrangible du spectre normal. »¹⁰⁵ Or, si le but principal de l'éclairage est d'assurer la perception des objets petits et de faciliter la lecture, il devient évident que les sources jaunes (becs de gaz ou lampes à incandescence) sont supérieures aux sources plus riches en radiations bleues (lampes à arc). De cela, il pourrait être conclu hâtivement que la comparaison pratique des sources colorées puisse se contenter de la méthode des acuités égales. Mais les deux Marseillais ne se satisfont pas de ce raccourci :

Nous croyons qu'une pareille assertion serait trop absolue, mais nous pensons que l'on doit considérer comme incomplète toute comparaison photométrique de deux sources diversement colorées, si elle n'a pas été effectuée parallèlement par les deux méthodes photométriques que nous avons étudiées.¹⁰⁶

105. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883 [MdLN83a], p. 207.

106. J. Macé de Lépinay et W. Nicati, *ibid.*, p. 208.

4.8 Des données précieuses pour l'optique physiologique

Dans son ouvrage, *Vision et reproduction des formes et des couleurs*, Henri Bouasse porte sur le travail des deux savants marseillais ce jugement ambigu :

Les phénomènes présentent une complexité qu'il était nécessaire de signaler, mais qui enlève au détail de cette étude la majeure partie de son intérêt scientifique. En définitive les pouvoirs éclairants relatifs de deux lumières diversement colorées dépendent des intensités, des aires des surfaces regardées, des méthodes de comparaison ; en dehors de quelques résultats peu nombreux, c'est pure affaire individuelle.¹⁰⁷

Si cette réflexion met à juste titre l'accent sur la complexité des phénomènes elle ne rend malheureusement pas justice à la difficile collecte des données, réalisée par Macé de Lépinay et Nicati, données venues enrichir les connaissances sur la vision des couleurs. Au moins la remarque de Bouasse force-t-elle à se pencher sur la portée des résultats obtenus par l'équipe de Marseille et à les croiser avec les recherches postérieures que d'autres auteurs ont consacrées à la caractérisation visuelle du spectre. Dans l'article qu'il consacre à l'« Histoire de la photométrie industrielle », DiLaura relate les premiers essais pour établir la « courbe de visibilité », exprimant la réponse oculaire en fonction de la longueur d'onde¹⁰⁸. Les travaux de Macé de Lépinay et Nicati sont curieusement ignorés par l'historien américain qui préfère mettre en lumière les recherches postérieures, menées par William de Wiveleslie Abney et Edward Robert Festing (1839-1912), publiées seulement en 1886¹⁰⁹. Ces deux auteurs utilisent un photomètre de Rumford et adoptent la méthode des ombres égales, choisie par les deux Français, à la différence que la lumière spectrale est celle de l'arc électrique, comparée à celle d'une bougie et que l'étendue du champ d'observation est considérable en regard du champ minuscule utilisé dans les expériences de Macé de Lépinay et Nicati¹¹⁰. La courbe de luminosité obtenue par Abney et Festing sur la lumière de l'arc est

107. Henri Bouasse, *Vision et reproduction des formes et des couleurs*, Paris, Delagrave, 1917, p. 184.

108. David L. DiLaura, « Light's measure : A history of industrial photometry to 1909 », *Leukos*, 1/3, janvier 2005, p. 75-149.

109. William de Wiveleslie Abney, Edward Robert Festing, « The Bakerian lecture : Colour photometry », *Phil. Trans.*, 1886, vol. 177, p. 423-456.

110. À titre de comparaison, Abney et Festing utiliseront une tige opaque de $\frac{1}{2}$ pouce de diamètre, soit 1,27 cm (ibid., p. 424).

assez proche de celle obtenue par Macé de Lépinay et Nicati sur la lumière solaire, avec un maximum situé autour de $0,577 \mu m$. Cependant, la publication des deux Britanniques ne fait aucunement mention de l'effet Purkyně, sur lequel se sont attardés Macé de Lépinay et Nicati ¹¹¹.

DiLaura attribue à Samuel Pierpont Langley la première publication de la fonction d'« efficacité lumineuse », datée de 1889 ¹¹². En utilisant un « bolomètre », instrument de son invention ¹¹³, Langley avait déjà longuement étudié la distribution de l'énergie dans le spectre solaire, en particulier dans l'invisible (infra-rouge) ¹¹⁴. Dans son étude de ce qu'il désigne par le terme « retinal absorption », l'Américain se limite à la comparaison des acuités visuelles dans les différentes régions du spectre (supra p. 231). L'astronome d'Allegheny ne semble pas s'intéresser à l'effet Purkyně, qui n'est pas cité dans sa publication. Parmi les résultats de cette étude, il faut noter que le maximum de l'intensité ressentie par F. S. W., l'un des observateurs mobilisés pour l'expérience, se situe à $0,55 \mu m$, qui est exactement la position du maximum de visibilité repérée par Macé de Lépinay et Nicati.

L'oubli de DiLaura masque inopportunistement l'attention prêtée aux travaux de Macé de Lépinay et Nicati par plusieurs auteurs qu'il convient de citer. Les résultats des deux Marseillais sont pris en compte et vérifiés par Arthur Peter König (1856-1901) dans deux articles datés respectivement de 1883 et de 1885 ¹¹⁵. Hugo Krüss (1853-1925) rappelle également leur estimation de l'angle maximal d'observation ($45'$) dans la méthode des ombres égales ¹¹⁶. Dans sa *Praktische Photometrie* publiée en 1907 ¹¹⁷, Emil Liebenenthal (1859-?) évoque également la plupart des travaux publiés par Macé de Lépinay et Nicati, y compris leur étude de l'effet Purkyně. On retrouve éga-

111. Abney et Festing se contentent de souligner que, si à faible intensité, le rouge perd proportionnellement plus de luminosité que les autres couleurs du spectre, cela n'a pas eu d'influence sur les résultats de leur étude (ibid., p. 433).

112. S. P. Langley, [Lan89], p. 1-23.

113. S. Pierpont Langley, « Le bolomètre, traduction du mémoire lu en décembre 1880 devant la Société météorologique américaine », *ACP*, 1881, sér. 5, tome 24, p. 275-284.

114. L'ensemble des travaux de Langley est référencé dans Charles D. Walcott, « Biographical memoir of Samuel Pierpont Langley, 1834-1906 », Washington, National Academy of Sciences, avril 1912.

115. A. P. König, « Ueber den Ort der Schnittpunkte der Intensitätscurven für die drei Grundempfindungen im normalen Auge », *Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft in Berlin*, 2/4, 1883 (1884), p. 24-26 et Id., « Ueber die Beziehung zwischen der Sehschärfe und der Beleuchtungsintensität », ibid., 4/16, 1885 (1886), p. 79-83.

116. Hugo Krüss, *Die elektro-technische Photometrie*, Vienne-Pest-Leipzig, A. Hartleben's Verlag, 1886, 25, p. 69-71.

117. Emil Liebenenthal, *Praktische Photometrie*, Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn, 1907.

lement des références dans l'abondante bibliographie du *Photometry* (1926) de John William Tudor Walsh (1892-1962), du National Physical Laboratory britannique. Le mémoire de 1881 est cité par William Weber Coblentz (1873-1962) et Walter Bradbury Emerson (1891-1980), de l'*US Bureau of Standards*, dans leur étude consacrée à la sensibilité relative de l'oeil aux lumières de différentes couleurs, publiée en 1917¹¹⁸.

L'ensemble de ces œuvres fournit un éclairage précis sur l'état de l'art des photomètres, au tournant du siècle. Les années quatre-vingts voient la production de plusieurs travaux consacrés à la comparaison photométrique des diverses parties du spectre. À quelques variantes près, les expérimentateurs utilisent l'une des deux méthodes imaginées de longue date, sans y apporter d'innovation notable : l'égalisation des ombres d'un photomètre de Bouguer-Rumford ; la méthode de l'acuité visuelle, expérimentée par Herschel. Parmi ces recherches, les travaux de Macé de Lépinay et Nicati se distinguent par leur complétude. Les deux Marseillais ne se sont pas contentés de la caractérisation du spectre à l'aune d'une seule méthode : ils ont confronté les résultats fournis par la méthode de l'acuité visuelle à ceux livrés par la recherche de l'égalité de « brillance » et mis en évidence des écarts importants pour les rayons les plus réfrangibles. Le partenariat noué entre le physicien et l'ophtalmologiste n'a pu que renforcer l'attention portée aux influences physiologiques, sur les mesures photométriques hétérochromes. Les travaux ont abouti à la comparaison photométrique complète des diverses parties du spectre, y compris là où se manifeste le phénomène de Purkyně. À cela s'ajoute la vérification de lois psychométriques importantes. La loi de Bouguer-Masson, admise pour les lumières blanches, se trouve étendue à toutes les radiations colorées. Enfin, l'étude réalise une analyse quantitative de phénomènes physiologiques incontournables : l'effet Purkyně et l'influence du scotome central. Pour autant, la difficulté des mesures, les artifices qu'elles nécessitent parfois ont empêché l'établissement de la courbe de réponse visuelle de différents observateurs, doués d'une vue normale d'abord, atteints de dyschromatopsie ensuite. L'objectif fixé par les deux auteurs de compléter les connaissances sur le daltonisme n'a donc pu être atteint. Là réside sans doute ce qui a limité la portée de cette étude. Il reste cependant à vérifier la valeur heuristique de méthodes réglées à partir d'un grand nombre de paramètres de nature physiologique et dont Bouasse met en doute la généralité, pour n'en faire qu'une « affaire individuelle ». Or une comparaison des nombres obtenus par Macé de Lépinay et Nicati est possible avec ceux d'études plus tardives,

118. William Weber Coblentz et Walter Bradbury Emerson, « Relative sensibility of average eye to light of different colors and some practical applications to radiation problems », *Bulletin of the Bureau of Standards*, 1917, 14, p. 167-236.

menées au début du XX^e siècle. Ces valeurs proviennent de panels élargis d'observateurs soumis à des méthodes nouvelles et systématiques, comme la méthode du *flicker* et la méthode *pas à pas*.

En 1893, Ogden Nicholas Rood (1831-1902) exposa le principe d'une méthode photométrique, indépendante de la couleur¹¹⁹. Rood mit en évidence l'existence d'un phénomène de « papillotement » (*flicker*) lorsque deux surfaces différant par leur luminosité (« brillance »), ou à la fois par la couleur et la brillance, sont présentées de façon alternée dans le champ de vision. Si les brillances des deux surfaces sont ramenées progressivement à des valeurs plus proches, l'impression de papillotement diminue jusqu'à disparaître complètement, lorsque leur égalisation est réalisée. La disparition du papillotement devient donc un critère d'égalité de la luminosité (« *equality of brightness* »). La méthode expérimentée pour des couleurs de surface¹²⁰ s'avère également adaptée aux lumières colorées des sources d'éclairage. En 1898, Rood était en mesure de présenter un prototype de photomètre à papillotement (*flicker photometer*)¹²¹. Véritable innovation, la méthode de Rood n'est pourtant pas sans soulever de nombreuses questions quant à son utilisation en métrologie photométrique. À l'opposé de la comparaison directe, elle dépend de la dynamique de réponse des récepteurs rétiniens à des stimuli lumineux, variables dans le temps. Il n'y a aucune raison pour qu'elle fournisse les mêmes résultats que la méthode de comparaison statique¹²². Plusieurs études, en particulier celles d'Herbert Eugene Ives (1882-1953)¹²³, éprouvèrent la méthode par papillotement et la méthode par égalisation directe, en faisant varier les conditions d'utilisation : éclairage et champ d'observation. L'expertise d'Ives conclut à ceci : la méthode par papillotement est plus sensible que la méthode statique d'égalisation des luminosités et elle conduit à des résultats davantage reproductibles¹²⁴. Comme le souligne Yves Le Grand : « En fait, pour un sujet donné, il y a bien des écarts systématiques, mais

119. Ogden N. Rood, « On a photometric method which is independent of color », *American journal of sciences*, 1893, sér. 3, 66/273, p. 173-176.

120. Rood utilisa une collection de disques colorés et de disques gris dont les niveaux formaient une échelle commode de clarté.

121. Ogden N. Rood, « On a flicker photometer », *Science*, nouv. sér., 7/179, 1898, 757-759.

122. Le phénomène de papillotement est l'objet d'une abondante littérature, que Carney Landis (1897-1962) a rassemblée en une bibliographie exhaustive : *An annotated bibliography of flicker fusion phenomena covering the period 1740-1952* (Ann Arbor, Mich. : Armed Forces – National Research Council, Vision Committee Secretariat, 1953).

123. Herbert E. Ives, « Studies in the photometry of lights of different colours », *Phil. Mag.*, 1912, sér. 6, 26, p. 149-189.

124. Il faut remarquer que les séries de mesures publiées par Ives en 1912 correspondent toutes à une exploration du spectre limitée vers l'extrémité bleue à 0,508 μm .

du même ordre de grandeur que ceux d'une même méthode appliquée à des sujets normaux différents. »¹²⁵

D'une utilisation possible pour des observateurs peu entraînés, le procédé imaginé par Rood sera rapidement adopté dans les laboratoires de métrologie photométrique, en particulier au pays qui l'a vu naître, par les ingénieurs du N.B.S. et de la puissante N.E.L.A.. Fondé en 1901, le National Bureau of Standards, institution fédérale et la N.E.L.A., National Electric Lamp Association qui préside, depuis 1885, aux destinées de l'industrie électrique aux États-Unis vont s'attacher à la promotion des standards américains, en particulier dans le domaine de l'industrie de l'éclairage. Leurs laboratoires, richement dotés, grâce, pour la seconde, aux contributions de grandes entreprises prospères pourront s'emparer de la question de la photométrie hétérochrome, qui deviendra leur spécialité. La mobilisation par ces institutions d'un nombre important d'observateurs va permettre d'établir la relation précise entre la distribution de l'énergie dans le spectre d'une source standardisée et la luminosité relative, perçue par les observateurs. Cette relation exprimée par les valeurs d'une fonction dite « courbe de visibilité » définit un « oeil moyen » pour les populations possédant une vision normale. La campagne menée par Coblentz et Emerson au NBS en 1917 mobilise ainsi 125 observateurs : les données recueillies par la méthode du papillotement conduisent à une courbe de visibilité s'étendant de $0,427 \mu m$ à $0,746 \mu m$, sur un domaine plus étendu que celui exploré par Ives. La lumière spectrale est celle d'une flamme à acétylène et la source de référence une lampe standard à filament de tungstène. La distribution de l'énergie dans le spectre a été déterminée par son balayage avec une thermopile. La position moyenne du maximum de visibilité pour les 125 observateurs est arrêtée à $0,557 \mu m$. Six ans plus tard, en 1923, Kasson S. Gibson (1890-1979) et Edward P. T. Tyndall (1893-1979), toujours du NBS, publient la courbe de visibilité moyenne pour 52 observateurs¹²⁶. Dans la méthode « pas à pas » (*step by step*) utilisée par Gibson et Tyndall, le champ d'observation est divisé en deux parties éclairées simultanément par deux lumières de longueurs d'onde très voisines, $\lambda - \frac{1}{2}\Delta\lambda$ et $\lambda + \frac{1}{2}\Delta\lambda$, où l'intervalle $\Delta\lambda$ est choisi suffisamment petit pour que l'observateur ne puisse être perturbé par une différence de teintes. Les valeurs ainsi obtenues révèlent un léger écart systématique avec les nombres de Coblentz et Emerson. La lumière spectrale provient d'une lampe à incandescence, utilisée au NBS comme « *fundamental standard of radiant energy* ». Présentées à la réunion de la Commission internationale de l'éclairage (CIE), tenue à

125. Yves Le Grand, [LG72], p. 43.

126. K. S. Gibson, E. P. T. Tyndall, « Visibility of radiant energy », *Scientific papers of the Bureau of Standards*, 1923, 19/475, p. 131-191.

Genève en 1924¹²⁷, les données de Gibson et Tyndall sont aussitôt adoptées comme définition « provisoire » de l'ainsi nommé : « observateur standard de référence ». La position moyenne du maximum de visibilité, arrêtée par Gibson et Tyndall à $0,555 \mu\text{m}$, correspond, là encore, au maximum de l'intensité, observé en 1883, dans le spectre solaire, par Macé de Lépinay et Nicati.

Bien plus que cette simple constatation, il est intéressant de comparer, sur toute l'étendue du spectre visible, les données obtenues par Macé de Lépinay et Nicati avec les valeurs publiées par les experts du NBS, quarante années après eux. Or la fonction de visibilité, désignée par $V(\lambda)$, correspond à l'intensité visuelle pour un spectre d'égale énergie, de densité unitaire¹²⁸. $V(\lambda)$ est donc le quotient de l'intensité lumineuse (en unité visuelle) par l'intensité de la source (en unité d'énergie)¹²⁹. Il est possible d'imaginer que les deux Français auraient pu produire en 1883 leur propre fonction de visibilité s'ils avaient disposé de valeurs précises sur la distribution de l'énergie rayonnée dans le spectre solaire. Comme les données à ce sujet étaient peu précises, les nombres publiés dans leur mémoire sont restés ceux de l'intensité visuelle perçue, rapportée à l'intensité maximum.

Cette difficulté peut être contournée si l'on dispose d'une bonne représentation du rayonnement solaire, à la surface de la Terre. Celle-ci est fournie par les valeurs normalisées de l'« illuminant D65 » adopté par la CIE. Il est donc aujourd'hui possible de déterminer la fonction de visibilité qu'auraient obtenue Macé de Lépinay et Nicati, à partir de leur courbe d'intensité lumineuse du spectre solaire. En divisant les valeurs relatives de l'intensité, obtenues par la méthode des ombres égales, par celles, relatives, de l'énergie spectrale de l'illuminant D65, on obtient une courbe de visibilité, remarquablement proche des estimations des ingénieurs du NBS (fig. 4.19), à cette différence près qu'elle ne représente que la vision moyenne de deux observateurs, Macé de Lépinay et Nicati eux-mêmes.

Une analyse plus fine demanderait une comparaison des éclairissements rétiens, perçus par les deux savants, avec ceux qu'ont subis les sujets sollicités par le NBS. La littérature¹³⁰ fait état de niveaux lumineux relativement faibles, à la limite du domaine photopique, pour les déterminations de Coblentz et Emerson et pour celles de Gibson et Tyndall. La description des

127. Au congrès de Berlin de 1913, la CIP (Commission internationale de la photométrie) avait décidé sa dissolution pour former la CIE. La nouvelle organisation devait prendre en compte l'augmentation importante des champs disciplinaires liés aux question de l'éclairage.

128. Une telle source fictive et normalisée par la CIE est appelée « illuminant E ».

129. Coblentz et Emerson, [CE17], p. 181.

130. Le Grand, [LG72], p. 75.

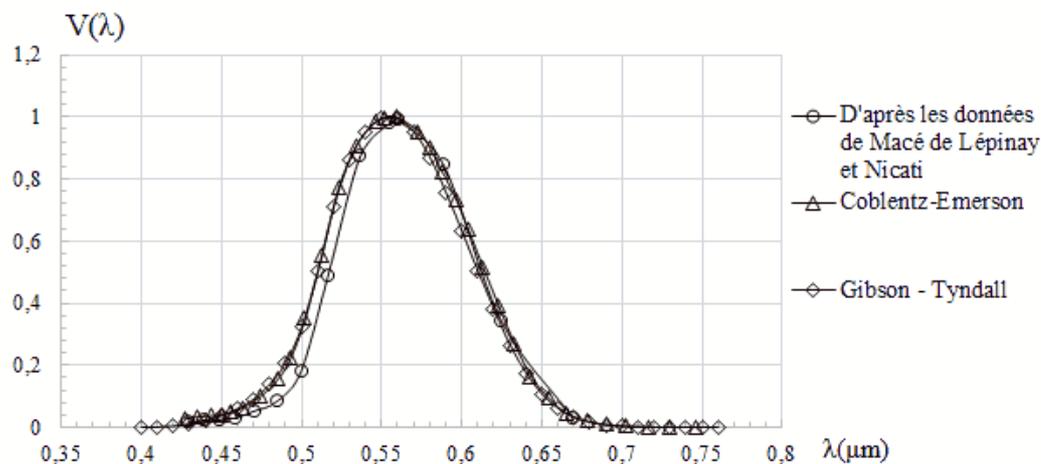


fig. 4.19 – Comparaison des fonctions de visibilité publiées par les ingénieurs du NBS avec les données de Macé de Lépinay et Nicati ramenées à un spectre unitaire. Tiré de J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883 [MdLN83a], p. 204.

appareils d'éclairage utilisés par Macé de Lépinay et Nicati semble indiquer qu'ils ont également travaillé avec des niveaux d'éclairage assez bas. Mais la méthode des ombres égales permet difficilement d'évaluer le niveau rétinien effectivement reçu¹³¹. Pour autant, la proximité des résultats obtenus à quarante années de distance, par le NBS et par le laboratoire marseillais, montre qu'en dépit des doutes exprimés par les deux Français, la méthode des « ombres égales » qu'ils ont choisie et améliorée, en limitant la surface d'observation à quelques millimètres carrés, fournit de la répartition de l'intensité dans le spectre solaire l'une des représentations les plus précises de l'époque.

La collaboration entre Macé de Lépinay et Nicati semble s'arrêter en 1883, après la publication de leur second mémoire puisque leur bibliographie ne fait pas mention de publications communes, après cette date. Macé de Lépinay reprend ses recherches en optique pure, qu'il oriente vers la mesure des longueurs par la méthode interférométrique. Il utilisera ce procédé pour la détermination du « volume du kilogramme d'eau ». Il participe aussi activement à la structuration de l'enseignement à la Faculté des sciences de Marseille et à la fondation de l'école d'ingénieurs de cette ville. De son côté, Nicati reprend ses recherches en physiologie : il livre, avec Maximilien

131. La seule indication, dans les mémoires de 1881 et 1883, sur l'éclairement du champ d'observation est que la quantité de lumière unitaire correspond à 0,02564 carcel/m² (J. Macé de Lépinay et W. Nicati, Mémoire de 1883, p. 190). 1 carcel correspond à 9,71 candelas ou 9,74 candelas, selon les équivalences.

Rietsch (1848-1905), une étude du bacille cholérique, lors de l'épidémie de 1884 qui touchera sévèrement la ville de Marseille. Cette circonstance a-t-elle empêché la poursuite de ses travaux sur la vision des couleurs, engagés avec Macé de Lépinay ? Nicati n'en poursuit pas moins des recherches en optique physiologique, qu'il consacre à la photométrie oculaire et à l'« oxyopimétrie » (la mesure de l'acuité visuelle)¹³². Il développera une théorie personnelle de la couleur.

4.9 Spectrophotométrie

Si les travaux de cette période ont enrichi l'optique physiologique, la question de la photométrie hétérochrome se pose toujours dans les dernières années du siècle. Pourtant, la comparaison photométrique de deux sources lumineuses différant par la couleur dispose, d'après Walsh, d'une solution rigoureuse : elle consiste à décomposer les deux lumières en leurs composantes monochromatiques et à comparer deux à deux les intensités des radiations correspondantes. La sommation de toutes ces valeurs (*discrètes*) sur le domaine visible du spectre conduit à l'intensité totale, c'est à dire au pouvoir éclairant de chaque source¹³³. La comparaison hétérochromatique des lumières composées des deux sources se trouve ainsi ramenée à plusieurs comparaisons de radiations identiques par la couleur. La méthode est longue et fastidieuse et, de surcroît, demande l'emploi d'un *spectrophotomètre*, instrument coûteux et d'un usage délicat. La spectrophotométrie est plus l'apanage des laboratoires de recherche que de ceux de la métrologie industrielle. Science jeune, adossée à la photométrie et souvent confondue avec la *spectroscopie*, elle mérite le récit de sa propre histoire. Initiée en France par Antoine Masson (*supra*, p. 204), elle mobilise des physiciens reconnus, dont André Crova qui vient de publier, dans l'année 1883, la description d'un instrument utilisable comme « spectrophotomètre pour l'analyse photométrique quantitative d'une source lumineuse quelconque, et notamment du Soleil et des foyers électriques, comparativement à l'étalon Carcel ; »¹³⁴.

Crova, et aussi Macé de Lépinay ne sont pas les derniers à remarquer que les sources lumineuses usuelles sont fondées sur l'incandescence de corps portés à haute température, qu'il s'agisse d'un filament métallique ou des particules de carbone dans la flamme d'une lampe. Le rayonnement des corps incandescents fait l'objet de nombreux travaux dont ceux réalisés par Ed-

132. W. Nicati, *Échelles visuelles et leurs applications - Oxyopimétrie - Photométrie - Typométrie*, Paris, Société d'éditions scientifiques, 1894.

133. Walsh, *Photometry*, London, Constable, 1926, p. 239-240.

134. A. Crova, « Description d'un spectrophotomètre », *ACP*, 1883, sér. 5, vol. 26, p. 556-573.

mond Becquerel, visant à déterminer la température à laquelle les corps deviennent lumineux¹³⁵. La photométrie devient le moyen de mesurer les hautes températures. Mais la loi décrivant le rayonnement en fonction de la température n'est pas encore établie et les données parcellaires conduisent à des extrapolations incertaines. On peut cependant remarquer que les sources à incandescence fournissent un spectre continu et qu'il est possible de déduire l'intensité I de la source des mesures de deux de ses composantes choisies, par exemple, dans le vert et dans le rouge. Soit R et V les intensités respectives des composantes rouge et verte. Pour des sources à incandescence placées à la même température T , les rapports $\frac{I}{R}$ et $\frac{V}{R}$ ont la même valeur d'une source à l'autre. Si la température T varie de façon continue, on conçoit que ces deux rapports varieront aussi de façon continue et l'on peut imaginer l'existence d'une fonction f liant ces deux rapports selon

$$\frac{I}{R} = f\left(\frac{V}{R}\right). \quad (4.9)$$

La fonction $f\left(\frac{V}{R}\right)$ ne peut être déterminée que de façon empirique, par des mesures réalisées sur différentes sources à incandescence. Les 52 mesures effectuées par Macé de Lépinay¹³⁶ conduisent finalement à la formule :

$$\frac{R}{I} - 1 = 0,208 \cdot \left(1 - \frac{V}{R}\right). \quad (4.10)$$

La vérification est faite « sur une lampe à incandescence de Schwann (sic), de 12 volts (i=0^{amp},95) ; on a trouvé $V = 0,167$ et $R = 0,184$. On en déduit, pour $\frac{V}{R} = 0,908$, $\frac{I}{R} = 0,98$, et, par suite, $I = 0,180$: l'expérience directe a donné $I = 0,182$. »¹³⁷. Les résultats sont excellents : avec d'autres sources lumineuses, comme la lumière *Drummond* et la lumière du Soleil, les écarts ne dépassant pas 2%. Macé de Lépinay conclut :

Il est donc possible de substituer à la mesure directe de l'intensité d'une source, deux mesures d'intensités de radiations de même espèce.¹³⁸

135. Edmond Becquerel, *La lumière, ses causes et ses effets*, tome premier *Sources de lumière*, Paris, Firmin Didot, 1867, p. 70-104.

136. Macé de Lépinay ne fournit pas d'information sur les arguments et la méthode ayant présidé au choix de cette fonction, se contentant d'évoquer des calculs effectués par la méthode des moindres carrés.

137. J. Macé de Lépinay, « Sur une méthode pratique pour la comparaison des sources usuelles diversement colorées. », *CRAS*, 1883, tome 97, p. 1428-1431.

138. J. Macé de Lépinay, *ibid.*, p. 1429.

La comparaison hétérochrome est ainsi remplacée par deux comparaisons homochromes. Toutefois, la solution proposée nécessite d'isoler, dans le spectre de la source, deux radiations (dans le rouge et dans le vert) et de mesurer leurs intensités respectives. Pour éviter l'emploi d'un spectrophotomètre et rendre la solution pratique, en particulier pour les contrôles industriels, Macé de Lépinay propose la comparaison des ombres avec un photomètre de Foucault, en observant celles-ci après avoir fait passer les lumières des deux sources (la lampe étalon et la source en essai) à travers deux solutions faisant office pour l'une de filtre vert et pour l'autre de filtre rouge. À cette fin, le physicien se tourne vers une « dissolution » dans l'eau de perchlorure de fer pur à $38^{\circ}B$ (pour le filtre rouge) et une « dissolution » dans l'eau de chlorure de nickel pur à $18^{\circ}B$ (pour le filtre vert)¹³⁹.

Dans la même période, Crova propose une méthode pour la comparaison des intensités de deux sources à incandescence dont les « températures d'émission » sont différentes. Elle permet de déduire l'intensité de la source en essai, en lisant l'intensité d'une seule de ses composantes dont la longueur d'onde est choisie très précisément en suivant la méthode suivante :

Supposons étalées, en deux spectres contigus, les radiations simples qui constituent la lumière émanant d'un régulateur électrique et celle d'une lampe Carcel étalon. Si les distances des deux sources au photomètre sont telles que leur éclairage moyen soit le même, les deux spectres seront loin de présenter le même aspect ; celui des pointes de charbon est plus intense vers l'extrémité violette et moins lumineux vers le rouge que celui de la lampe. La température d'émission de la lumière électrique étant bien supérieure à celle de la lampe, le rapport des intensités des radiations simples de la lumière électrique aux intensités des lumières correspondantes du spectre de la flamme de la lampe sera, à égalité d'éclairage moyen, représenté par une fraction plus grande que l'unité vers le violet ; mais, si l'on se rapproche du rouge, ce rapport diminuera graduellement, en obéissant à la loi de continuité, et sera moindre que l'unité à l'extrémité rouge.

Il existe donc une radiation simple déterminée, dont la longueur d'onde dépend de la nature des deux lumières comparées, et pour laquelle ce rapport est exactement égal à l'unité ; si cette radiation est exactement connue, la mesure du rapport de ses inten-

139. Il s'agit du degré Baumé, unité qui n'est plus légale en France depuis 1961.

sités, dans les deux spectres, donnera *exactement* le rapport des intensités totales des deux sources.¹⁴⁰

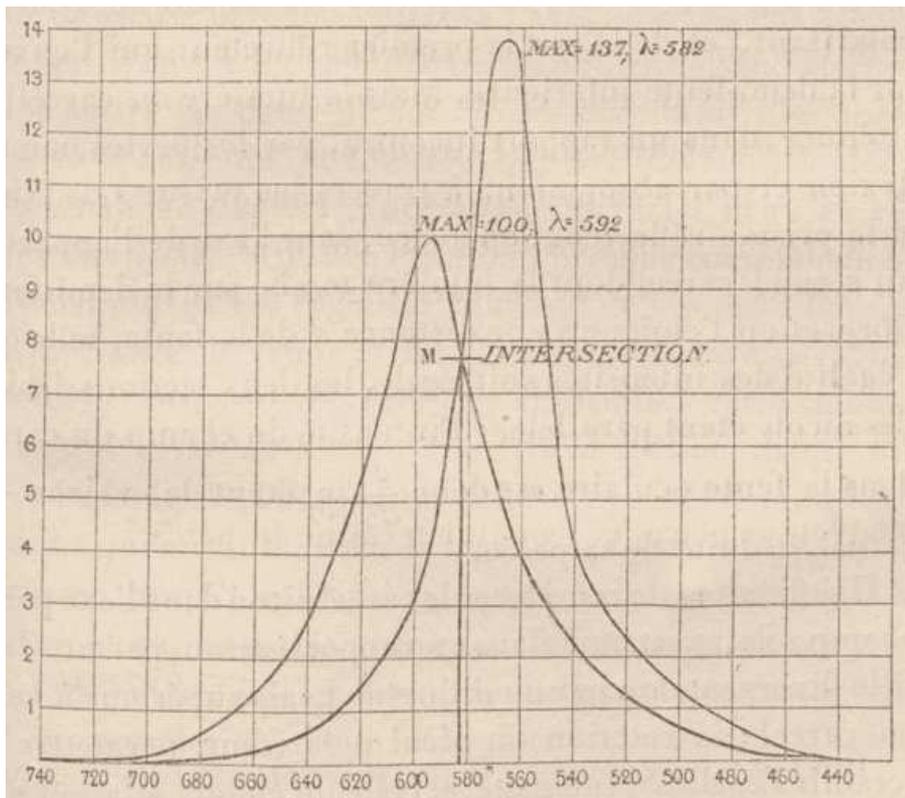


fig. 4.20 – Méthode de Crova : comparaison de la lumière solaire (courbe de droite) à la lampe Carcel. Les longueurs d’onde sont exprimées en millièmes de micromètre. Les ordonnées sont calculées de telle sorte que les surfaces sous les deux courbes soient égales entre elles, en remarquant que cette surface commune représente le pouvoir éclairant total. Tiré de Crova, « Comparaison photométrique des lumières de teintes différentes », *ACP*, 1885, sér.6, tome 6, p. 535.

La comparaison de la lumière solaire à celle de la lampe Carcel donne un rapport unité pour la longueur d’onde $\lambda = 0,582 \mu\text{m}$.

Cette radiation est donc celle dont l’intensité est la même dans les deux lumières, lorsque les pouvoirs éclairants sont égaux. La comparaison des pouvoirs éclairants relatifs de la lumière solaire

140. A. Crova, « Comparaison photométrique des sources lumineuses de teintes différentes. », *CRAS*, 1881, tome 93, p. 512-513.

et de celle de la lampe se réduit à celle des intensités relatives de la radiation 582. »¹⁴¹

Il reste qu'il faut isoler cette radiation dans les spectres de la lumière sous test et de la lampe Carcel. Plusieurs moyens sont proposés par Crova comme l'utilisation d'une solution absorbante. Celle d'un mélange de perchlorure de fer et de chlorure de nickel, dans une cuve de 7 mm d'épaisseur permet ainsi de limiter le domaine spectral observé entre les radiations 630 et 534 (sous entendu en millièmes de micromètre). Une augmentation de l'épaisseur isole le maximum d'intensité dans le domaine (580 - 582), condition la plus favorable à la photométrie solaire¹⁴². Cette méthode permet ainsi d'obtenir un « monochromatisme » approché mais satisfaisant pour de nombreux foyers lumineux.

Un autre procédé consiste à se placer en lumière polarisée. Crova ajoute à l'oculaire du photomètre de Foucault, utilisé pour la comparaison, une lunette construite par Duboscq. À l'intérieur de cet accessoire sont placés deux prismes de Nicol, entre lesquels s'interpose une lame de quartz. On conçoit que le premier prisme polarise les lumières issues des deux sources censées éclairer chaque moitié de l'écran du photomètre. La lame de quartz provoque la rotation des plans de polarisation des différentes radiations. Le second nicol, faisant office d'analyseur permet d'atténuer les radiations non désirées, pour permettre la comparaison des deux champs du photomètre, dans la longueur d'onde voulue.

Crova fait remarquer que « Si l'on se base sur la théorie des radiations émises par les corps incandescents, on verra que, si le maximum d'énergie se déplace vers le violet à mesure que la température d'émission s'élève, le maximum de pouvoir éclairant doit aussi se déplacer dans le même sens »¹⁴³. Si la radiation 582 caractérise la comparaison des pouvoirs éclairants du Soleil et de l'étalon Carcel, la méthode permet aussi une comparaison satisfaisante pour les lumières comprises entre la radiation 592 correspondant au maximum d'émission d'une lampe à modérateur et la radiation 564 correspondant au maximum d'émission pour le Soleil. Crova conclut :

La méthode s'applique donc à toutes les lumières employées pour l'éclairage et, à ce titre, elle est d'un usage général.¹⁴⁴

141. A. Crova, « Comparaison photométrique des lumières de teintes différentes », *ACP*, 1885, sér.6, tome 6, p. 536.

142. A. Crova, *ibid.*, p. 539-544.

143. A. Crova, [Cro85a], p. 544.

144. A. Crova, *ibid.* p. 545.

L'intérêt de la méthode, appelée « *Wave-number method* », est en effet souligné par Walsh dans son traité de photométrie, pour la comparaison des pouvoirs éclairants de sources rayonnant approximativement comme un « corps noir ». Elle s'applique à des modèles variés de lampes à incandescence (à filaments de carbone ou de tungstène). Une abaque tracée au préalable fournit les valeurs des nombres d'onde pour les différentes températures d'émission¹⁴⁵. Il reste à effectuer la comparaison photométrique pour le *nombre d'onde*¹⁴⁶ ainsi déterminé.

4.10 Conclusion

Les efforts déployés dans les dernières décennies du siècle n'apporteront pas la solution universelle au problème « récalcitrant » de la photométrie des sources diversement colorées. En 1913, plus de trente années après le début des travaux évoqués dans ce chapitre, Charles Fabry (1867-1945) déclare :

*In actual practise, we cannot think of making a complete analysis, qualitative and quantitative of every light to be measured. So long as the eye will be used in photometric measurements, the equalization of two illuminations on the photometric screen is all that can be asked for the ordinary observer, and this equalization can be accurately made in only one case, i. e., when the lights are of the same color. We are thus led to eliminate from practise any heterochromatic measurement. . .*¹⁴⁷

propos qui semble indiquer le souhait de Fabry de voir un détecteur fondé sur une physique irréprochable venir remplacer l'œil pour toutes les déterminations photométriques, qu'elles soient homochromes et surtout hétérochromes. Car l'œil est ainsi fait qu'il ne peut tout simplement pas se prononcer sur l'égalité des « brillances » de deux lumières chromatiquement différentes, impossibilité liée à la constitution et à la distribution des récepteurs rétiniens et à de multiples phénomènes dont l'étude relève des neuro-sciences. Cette incapacité a un impact direct sur la photométrie industrielle en empêchant l'évaluation précise des pouvoirs éclairants des luminaires du commerce, par comparaison avec les étalons des laboratoires de contrôle. Diverses solutions sont proposées qui reposent sur l'artifice suivant : ramener la comparaison hétérochrome en une ou plusieurs comparaisons homochromes. Des solutions

145. J. W. T. Walsh, [Wal26], p. 240-242.

146. Le nombre d'onde est l'inverse de la longueur d'onde.

147. C. Fabry, « A practical solution of the problem of heterochromatic photometry », *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 1913, vol. 8, p. 303.

absorbantes permettant d'isoler dans les lumières à comparer des bandes de longueurs d'onde chromatiquement semblables.

Lors de la première session de la Conférence des Unités électriques, réunie à Paris en 1882, la commission en charge de l'étalon de lumière fait les recommandations suivantes :

Pour les comparaisons de précision, la Commission recommande l'emploi de spectro-photomètres et d'autres méthodes scientifiques qui substituent des mesures exactes à l'appréciation physiologique d'un éclairage moyen.

Pour les comparaisons usuelles, elle exprime le vœu que des expériences soient faites pour déterminer le degré de précision des diverses méthodes photométriques, notamment celles de Foucault, de Bunsen et de Rumford.¹⁴⁸

Cet avis instaure une séparation nette entre une photométrie physique dont les méthodes objectives seraient seules garantes de mesures exactes et une photométrie visuelle, donc humaine, n'offrant que des évaluations soumises à la physiologie de la vision et aux erreurs personnelles. La photométrie pratique se trouve ainsi placée en balance entre la première qui dispose d'instruments aux optiques coûteuses et soignées et la seconde toujours nantie des photomètres rudimentaires de Rumford, Foucault et Bunsen. Mais les recommandations exprimées en 1882 peuvent-elles s'appliquer encore dans les toutes dernières années du siècle, lorsque s'est renforcée l'industrie de la lampe à incandescence. Encore réservé à une élite fortunée, le produit de luxe réclame des contrôles sévères, exécutés dans des laboratoires de métrologie industrielle, parfaitement équipés, par des personnels expérimentés.

La question de la photométrie hétérochrome non encore résolue, à la fin du siècle, a néanmoins permis d'importants progrès sur la connaissance des phénomènes visuels. Les données acquises par Macé de Lépinay et Nicati, en utilisant la méthode des ombres égales se trouvent confirmées par les résultats plus tardifs des équipes du N.B.S. américain. Ainsi, la sensibilité de l'œil aux différentes radiations du spectre peut être représentée par les valeurs sûres de la courbe de visibilité $V(\lambda)$ dont la position du maximum, $0,55 \mu m$, publiée par l'équipe de Marseille en 1883, est exactement celle utilisée pour la définition actuelle de l'unité d'intensité lumineuse, la Candela. Elle a aussi permis de porter l'attention sur un phénomène incontournable : l'effet

148. France, ministère des Affaires étrangères, *Conférence internationale pour la détermination des Unités électriques : 16 octobre - 26 octobre 1882, procès-verbaux*, Paris, Imprimerie nationale, 1882, p. 142.

Purkyně. Les études montrent également que la méthode de comparaison directe des « brillances » et la méthode de comparaison de l'acuité visuelle dans les différentes parties du spectre solaire ne sont pas équivalentes et conduisent à des résultats très divergents, dans la partie la plus réfrangible du spectre.

À une époque où était contestée la place de la photométrie parmi les sciences objectives, les coopérations engagées entre les physiciens et les physiologistes à l'exemple du partenariat entre Macé de Lépinay et Nicati à Marseille, ont participé à la création de la métrologie photométrique, assurant le lien entre métrologie physique et métrologie sensorielle.

Chapitre 5

Étalons de lumière et grandeurs photométriques

Les sources historiques portant sur la photométrie montrent que la question de l'unité de lumière s'est posée tardivement. Au temps de Bouguer, évaluer la « force ou la vivacité de la lumière » procède par comparaison avec une seconde source lumineuse dont il est dit peu de choses : « Je remarquai que la lumière de la Lune étoit égale à celle d'une chandelle éloignée de moi de 27 pieds »¹, « chandelle » dont on ne donne aucune description (dimensions, hauteur de la mèche, matière, cire ou suif), compromettant ainsi la reproduction de l'expérience sur la lumière de l'astre dans une autre de ses phases, ou de ses parties gibbeuses. Le premier XIX^e siècle reste également peu disert sur les lumières « unités ». Mais comment mesurer, *peser* une quantité de lumière, ce fluide que les savants du temps qualifient d'« impondérable ». On compare donc, comme du temps de Bouguer, tout en signalant un peu mieux la source de comparaison. On note ainsi que si l'on privilégie en France les lampes à huile, bec de Quinquet ou lampe Carcel, on reste outre-Manche fidèle à la bougie. On compense la variabilité de la lumière de référence en multipliant les essais et en lissant les résultats par une moyenne. Arago, qui a consacré plusieurs mémoires à la photométrie, n'utilise dans aucune de ces lignes les mots « étalon de lumière », leur préférant « source ou *terme* de comparaison ». Cette nuance sémantique dans les écrits d'Arago met bien en évidence la différence matérielle entre l'étalon, objet unique et invariable qui est la *réalisation* de l'unité de lumière et une source de référence contingente, dont le statut dépend des circonstances de la comparaison. Le terme « Étalon photométrique » ne se fait une place dans la littérature que dans la seconde moitié du siècle, quand il apparaît en 1864, en première page de l'ouvrage d'Émile Durand, *Étalon légal ou mesure type du pouvoir éclairant du gaz*, qui

1. P. Bouguer, *Essai*, 10.

reproduit les résultats de l'expertise de Dumas et Regnault (supra chap. 3, p. 174)².

L'« étalon légal » annoncé par Durand est la lampe Carcel décrite avec une précision exemplaire par Dumas et Regnault. Si elle participe en France à la première standardisation de la mesure du pouvoir éclairant du gaz d'éclairage, peut-elle pour autant prétendre au rang d'étalon de lumière ? Dans l'édition de 1892 de son *Traité de photométrie industrielle spécialement appliqué à l'éclairage électrique*, Adrien Palaz pose clairement le problème de la définition d'un étalon de lumière :

Les prototypes du système métrique peuvent être représentés matériellement, et cette représentation est invariable en un lieu donné. Il ne peut en être de même de l'étalon lumineux absolu, ni des étalons secondaires ; ils doivent être construits chaque fois que l'on veut en faire usage, et il faut, pour les entretenir, dépenser une certaine quantité d'énergie.

La valeur de l'étalon de lumière dépend de l'énergie dépensée et des conditions dans lesquelles cette transformation d'énergie s'effectue. La seule chose que l'on puisse faire, c'est d'employer des appareils de dimensions déterminées et donnant, dans des conditions fixes, la même intensité lumineuse.³

Le succès que représente la signature de la Convention du mètre en 1875, la réalisation des prototypes internationaux pour l'unité de longueur et pour l'unité de masse, le mètre et le kilogramme, ne peuvent qu'encourager la communauté scientifique à étendre son œuvre aux unités électriques et à l'unité de lumière. Mais sur des enjeux économiquement si importants, cette communauté n'est plus seule à agir : la recherche fondamentale peut bénéficier d'un nouveau cadre institutionnel modifié en effet par des initiatives de deux sortes : la création de laboratoires nationaux en charge de la conservation et de la reproduction des étalons ; l'organisation de congrès internationaux favorisant la confrontation des travaux de recherche.

Ce chapitre s'intéresse à l'avancée des travaux sur l'unité de lumière et, dans la première section 5.1, décrit le nouveau cadre de ces recherches où s'impliquent à la fois le pouvoir politique et des intérêts privés, à travers, en France, une société savante influente : la Société internationale des électriciens. Maintenant que l'éclairage électrique est bien lancé, les questions de la

2. E. Durand, *Étalon légal ou mesure type du pouvoir éclairant du gaz. Commentaire sur l'Instruction pratique de MM. Dumas et Regnault*, Paris, 1864.

3. A. Palaz, op. cit. [Pal92], p. 96-97.

photométrie sont totalement intégrées dans les programmes de ces réunions et sont devenues des sujets de choix pour les électriciens (supra p. 211). Ce chapitre examine les recommandations formulées, à l'issue de leurs assises successives, sur les unités et les grandeurs photométriques et la portée de ces directives dans les espaces nationaux.

La section suivante aborde la question des étalons à flamme et la difficulté d'un consensus entre la lampe Carcel française, la lampe Hefner allemande et la lampe au pentane de Vernon-Harcourt britannique. Ces références qui ont une valeur certaine pour évaluer le gaz d'éclairage se révèlent insuffisantes devant la lumière électrique en raison des différences chromatiques.

La section 5.3 suivante s'intéresse à la proposition de Jules Violle de choisir la lumière émise par 1 cm^2 de la surface d'un bain de platine fondu, pendant la solidification. Pendant le changement d'état, il est établi que la température du platine est rigoureusement constante et il en est, par conséquent, de même pour l'intensité lumineuse rayonnée. Selon Violle, cette lumière réalise un étalon *primaire*, reproductible par les différents laboratoires nationaux. La réception de la suggestion de Violle mérite une attention particulière. Bien que validée par les conférences de 1882, 1884 et le congrès de 1889, l'unité Violle ne sera guère utilisée que dans l'espace francophone. En dehors, les recommandations de ces réunions internationales resteront lettre morte. Cette indifférence relève-t-elle d'un certain parti pris, comme le suggère André Blondel (infra) ou d'une confusion entre étalon absolu et étalon pratique ? Cette question suggère d'estimer la valeur heuristique de l'étalon Violle.

La section 5.4 se penche sur les débats du congrès des électriciens de 1893, à Chicago. Cette réunion permet à Blondel de présenter le prototype d'un arc électrique comme étalon secondaire, adapté à l'évaluation de cette lumière. La confusion est patente chez Silvanus Phillips Thompson (1851-1916) qui se heurte au jeune ingénieur du Service des phares. Le Britannique propose, en remplacement de l'unité Violle, sa propre unité qu'il nomme unité « Swinburne-Thompson » et qui n'est autre que la lumière de l'arc, promue au rang d'étalon primaire.

La section 5.5 évoque l'obligation, pour les photomètres de la fin du siècle, de construire avec rigueur le formalisme de leur science. L'utilisation abusive du modèle de source ponctuelle, placée au foyer d'une lentille convergente ou d'un miroir parabolique conduit à la mise en défaut de la loi de l'inverse du carré de la distance. La section s'intéresse aux apports d'André Blondel à la construction du corps des notions fondamentales qui manquent à la photométrie.

La section 5.6 est une présentation du système des grandeurs photométriques, proposé par Blondel et une discussion de son œuvre saluée au Congrès des électriciens réunis à Genève, en 1896.

Enfin la dernière section 5.7 de ce chapitre conclut cette histoire de la photométrie au XIX^e siècle par une évocation du dernier congrès des électriciens de ce siècle, à l'occasion de l'exposition universelle de Paris 1900. Elle se penche aussi sur le Congrès international de l'Industrie du gaz, tenu en marge de cette manifestation. Sous la présidence de Théodore Vautier, ce congrès décidera la nomination d'une Commission internationale « à l'effet de fixer les règles à suivre dans les observations photométriques des becs à incandescence par le gaz ». Cette assemblée baptisée Commission internationale de la photométrie (CIP) cessera ses activités à son congrès de 1913, pour décider la création de la Commission internationale de l'éclairage (CIE).

5.1 Instances nationales et congrès internationaux, le nouveau cadre institutionnel de la recherche

Le second XIX^e siècle voit se dérouler une succession de congrès scientifiques, sans équivalent dans l'histoire⁴. La multiplication de ces rassemblements suit une croissance exponentielle dont Anne Rasmussen situe l'origine à l'année 1867, « date à laquelle le nombre des congrès internationaux devient significatif,... »⁵ et qui coïncide à la tenue, du 1er avril au 3 novembre, à Paris, de *l'Exposition universelle d'art et d'industrie*. La signature de la Convention du mètre en 1875, comme les efforts de l'Association britannique pour définir un système absolu pour les unités électriques sont des étapes majeures dans ce mouvement de « modernité et de globalisation »⁶ de la métrologie physique. Mais qu'en est-il de la « métrologie sensorielle » dont dépend la validité des méthodes de la photométrie ? Va-t-elle bénéficier de ce même mouvement encouragé, notamment en France, par les pouvoirs publics ?

4. Voir Anne Rasmussen, « Jalons pour une histoire des congrès internationaux au XIX^e siècle : Régulation scientifique et propagande intellectuelle », *Relations internationales*, n°62, été 1990, 115-133.

5. Anne Rasmussen, « Les Congrès internationaux liés aux Expositions universelles de Paris (1867-1900). » In : *Mil neuf cent*, 1989, n°7, *Les congrès lieux de l'échange intellectuel 1850-1914*, p. 23-44 et voir aussi de la même autrice *L'internationale scientifique (1890-1914)*, thèse EHESS, 1995.

6. Kapil Raj et H. Otto Sibum, Dominique Pestre (dir.), *Histoire des sciences et des savoirs 2. Modernité et globalisation*, Paris, Seuil, 2015.

Les recherches effectuées dans le pays, dans les dernières décennies du siècle, sur la question de l'étalon lumineux doivent être comprises comme une mission confiée par le gouvernement de la République à la communauté scientifique. Elles répondent, certes d'abord, aux demandes des électriciens d'obtenir une quantification de l'éclairage électrique. En attendant, quand Adolphe Cochery, en charge du ministère (nouvellement créé) des Postes et des Télégraphes (1879-1885) et fondateur de l'École supérieure de télégraphie (1878)⁷ remet au Président de la République, Jules Grévy (1807-1891), le rapport concernant la convocation à Paris, en 1881, du Congrès des électriciens, il use de termes on ne peut plus explicites quant à l'implication nécessaire des pouvoirs publics, dans le développement déjà considérable de la jeune technologie électrique :

Le Congrès doit être l'œuvre du Gouvernement, car lui seul peut donner à l'entreprise le caractère d'indépendance qui est la condition essentielle du succès. Quant à l'Exposition, elle sera facilement organisée par l'initiative privée. Le patronage et le concours bienveillant de l'État lui seront toutefois assurés et le palais des Champs-Élysées sera mis gratuitement à la disposition de ses organisateurs.⁸

Lors de ce premier Congrès international des électriciens, qui se tient donc à Paris en 1881 (supra p. 211), les limites physiques à la réalisation d'un étalon de lumière, soulignées par Palaz en 1892, sont déjà au cœur des discussions qui visent un accord sur la question cruciale : « À défaut d'une unité absolue pour la définition des intensités lumineuses existe-t-il un type qui puisse être recommandé comme étalon international ? »⁹ Les termes employés ne laissent guère augurer la définition d'une unité absolue dans un avenir proche. Au moins faut-il s'entendre sur un « type » pratique, utilisable par chaque pays, entente qui relève de la même « diplomatie scientifique » que celle mise à l'œuvre pour la Convention du mètre, en 1875. L'avancée des travaux sur l'unité de lumière est lente et difficile. Christine Blondel ne dénombre pas moins d'une douzaine de congrès internationaux d'électricité entre 1881 et 1911¹⁰ où sera invariablement discutée l'unité de lumière. Une politique vo-

7. Si le télégraphe est tombé en désuétude, cette administration est essentielle, à l'époque, à la bonne marche du pays en assurant la transmission des nouvelles et des dépêches sur tout le territoire et aussi par delà la Manche. En tant que sénateur d'Eure et Loir, Cochery s'intéressera de près à l'installation du câble sous-marin, entre Calais et Folkestone (août 1890).

8. Congrès international des électriciens, 1881, [Min82b], p. 3.

9. Congrès international des électriciens, 1881, *ibid.*, p. 34.

10. Christine Blondel, « Négociations entre savants, industriels et administrateurs : les

lontariste est mise en place. Mieux, lors de la séance de clôture du Congrès, le 5 octobre 1881, la définition de l'étalon photométrique est explicitement placée sous la responsabilité du gouvernement : le Congrès ayant émis « le vœu que le Gouvernement français veuille bien inviter les autres Gouvernements à constituer trois Commissions internationales » chargées de résoudre les questions restées en suspens. La première commission serait en charge de la réalisation pratique de l'*Ohm* ; la seconde s'occuperait en particulier des effets de l'électricité atmosphérique et des dispositifs de protection des réseaux de télégraphe et de téléphone ; enfin, à la troisième commission, la tâche de : « Déterminer un étalon définitif de lumière, et les dispositions à observer dans l'exécution des expériences de comparaison. »¹¹

Œuvre du gouvernement donc, poursuivie par l'organisation des deux sessions de la Conférence internationale des unités électriques, toujours à Paris en 1882 et 1884. Cochery est toujours à la manœuvre pour présider les deux conférences dont les travaux intéressent, au premier chef, la couverture du pays par un réseau télégraphique sûr. L'administration française des *P & T* est présente en force à la première session, avec la participation de Louis-Marcellin Bergon (1822-1911), Directeur du matériel et de la construction au Ministère des Postes et des Télégraphes et d'Édouard Ernest Blavier (1826-1887), Inspecteur-général des Télégraphes, Directeur de l'École supérieure de télégraphie, auxquels s'ajoute Éleuthère Mascart, Professeur au Collège de France, Directeur du Bureau central météorologique qui devait participer à l'étude des meilleures conditions d'établissement d'un réseau *télé-météorographique* international, étude qui se trouvera finalement ajournée. L'implication gouvernementale dans les réunions internationales, intéressées à la détermination de l'étalon de lumière est évidente.

Mais la réalisation, la conservation et la reproduction des étalons demandent des laboratoires de métrologie, à la pointe de l'innovation. En France, ces missions ont été confiées de longue date, depuis la mise en place du système métrique, au Conservatoire national des arts et métiers. C'est dans cet établissement qu'ont été confectionnées, en 1799, les copies du prototype de Lenoir, pour la diffusion du mètre dans les départements et à l'étranger. Durant le siècle, « Le Conservatoire assure progressivement une fonction de partenaire technique indispensable à la fabrication de la précision. »¹² C'est

premiers congrès internationaux d'électricité », *Relations internationales*, été 1990, n°62, p. 171-182.

11. Congrès international des électriciens, 1881, [Min82b], p. 150.

12. Claudine Fontanon, Loïc Petitgirard, « Du Système métrique au Laboratoire d'essais : le Cnam et la Métrologie nationale (1795-1960). », *Cahiers d'histoire du Cnam*, 2015, *Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses*, vol.03 (1), p. 13-37. hal-03790233.

toujours le Cnam qui, en 1848, devient « le dépôt central des étalons et prototypes du Système métrique, mission confiée par le ministre de l'Agriculture et du Commerce "dans l'intérêt de la science et de l'industrie". »¹³ C'est encore au Cnam qu'est effectuée la fonte en alliage de platine et d'iridium de la fameuse règle au profil en X du prototype du mètre, sous la supervision du général Morin (Arthur Morin, 1795-1880) et de Henri Tresca (Henri Édouard Tresca, 1814-1885). Une histoire détaillée de cette réalisation et du rôle qu'y a également tenu Jean-Baptiste Dumas est fournie par Louis Marquet¹⁴.

Si l'État exerce une tutelle attentive sur le Conservatoire des arts et métiers et veille à la fabrication des étalons de la mécanique, c'est à l'initiative de financements privés qu'un autre laboratoire métrologique, le Laboratoire central d'électricité, est créé à Paris, afin d'assurer la métrologie électrique.

VIII. — Laboratoire central d'Électricité.

38. Le Laboratoire central d'Électricité a pour objet de :

- 1° Réunir et conserver une série d'étalons de toutes les grandeurs électriques ;**
- 2° Former une bibliothèque aussi complète que possible des ouvrages français et étrangers traitant d'Électricité ;**
- 3° Étalonner des appareils de mesure appartenant à des tiers ;**
- 4° Déterminer les constantes d'appareils électriques industriels : piles, accumulateurs, dynamos, brûleurs, etc. ;**
- 5° Étudier des appareils nouveaux ou des méthodes nouvelles ayant trait à l'Électricité ;**
- 6° Faciliter des études et des recherches personnelles sur le même sujet.**

fig. 5.1 – Chapitre VIII du règlement intérieur relatif au Laboratoire central d'électricité, *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, Paris, Gauthier-Villars, 1893, tome 10, p. 115.

Dans la dynamique du succès de l'Exposition internationale d'électricité, la Société internationale des électriciens est constituée, à l'été 1883, à l'initiative d'une centaine de personnalités scientifiques : ingénieurs, industriels, mais aussi savants académiciens, comme Jean-Baptiste Dumas, et personnalités politiques comme Adolphe Cochery. Société internationale, de *tous* les électriciens, y compris de l'étranger, donc ! Les bénéfices conséquents de l'exposition, les souscriptions auxquelles ont répondu de nombreux et généreux donateurs en font une société savante prospère, à même de financer ce nouveau laboratoire. Les missions de cet établissement ne se limitent pas à la conservation des étalons de la science électrique, qui ne peuvent être

13. C. Fontanon, L. Petitgirard, *ibid.*, p. 19.

14. Louis Marquet, « Il y a cent ans : Jean-Baptiste Dumas et la Convention du Mètre », *Revue d'histoire de la pharmacie*, 63^e année, n°227, 1975. p. 559-567.

ici que des étalons matériels pratiques, elles concernent aussi des travaux d'étalonnages à la demande des particuliers et des industriels et le prêt de ses installations pour des activités de recherche. Le LCE est attaché clairement à soutenir une relation forte avec l'industrie électrique, par son offre de services techniques. Comme le soulignent Claudine Fontanon et Loic Petitgirard, ce n'est pas aussi évident pour le Conservatoire des arts et métiers car la création, par la loi du 9 juillet 1901, du Laboratoire d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines, au sein même du Cnam, ne va pas clarifier la situation et la répartition des missions entre ces différents acteurs de la métrologie. La France possède donc des laboratoires modernes pour la réalisation des unités et la conservation des étalons. Elle peut également fournir à son industrie les instruments et les méthodes métrologiques les plus avancées¹⁵.

À l'étranger, la dynamique de création des laboratoires nationaux s'inscrit dans des processus et des temporalités différentes. Ainsi la métrologie allemande se trouve rassemblée au sein d'une institution unique : la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* (PTR). La fondation de ce laboratoire, en 1887, à l'initiative de l'industriel Werner von Siemens et de Hermann von Helmholtz, qui en sera le premier président de 1888 à 1894, fait aussi partie du processus d'unification de l'Empire allemand, qui procède aussi par l'établissement d'un système légal d'unités¹⁶. Au Royaume-Uni, la création en 1899 du *National Physical Laboratory* (NPL) est donc un peu plus tardive, mais la métrologie peut déjà s'appuyer sur les laboratoires de plusieurs institutions comme le *Cavendish laboratory* de l'université de Cambridge et le *Davy-Faraday Research Laboratory* de la Royal Institution, inauguré en 1896. Ainsi, selon Claudine Fontanon et Loic Petitgirard, si la tendance outre-Manche et en Allemagne est au rassemblement des différents acteurs de la métrologie au sein d'un seul laboratoire national, à l'inverse en France, « avec la création du Laboratoire central de l'électricité, la dynamique sur la fin du XIX^e siècle n'est pas à la convergence organisationnelle »¹⁷.

15. Contrairement à ce qui est affirmé dans l'ouvrage de Sean François Johnston, la France s'était dotée, comme les autres nations, et même avant elles, de laboratoires de dimensions nationales, en charge des essais et des étalonnages d'instruments au service de l'industrie. De même, les publications nombreuses des scientifiques français dans les bulletins de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale et le Bulletin de la Société internationale des électriciens, entre autres, infirment l'hypothèse avancée par Harry Paul à ce sujet, d'un désintérêt de ces derniers pour les choses de l'industrie. Dans Sean François Johnston, *A History of Light and Colour Measurement Science in the Shadows*, Institute of Physics, Bristol and Philadelphia, 2001, p. 118.

16. Sur l'histoire du PTR, voir « PTR/PTB : 125 Jahre metrologische Forschung », *PTB Mitteilungen Fachjournal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt*, 2012, n° 2.

17. C. Fontanon et L. Petitgirard, [FP15], p. 25.

C'est dans ce contexte que vont s'effectuer les recherches de l'étalon de lumière. Science négligée, aux méthodes jugées simplistes, voire triviales, la photométrie devient, en ce XIX^e siècle tardif, le centre d'intérêt d'une communauté scientifique qui sait organiser ses échanges à l'occasion de ses congrès et par le biais de sociétés savantes et d'organisations professionnelles influentes, comme l'*American Institute of Electrical Engineers*, fondée en 1884 ou la *Society of Telegraph Engineers* britannique, fondée en 1871 et rebaptisée en 1888 *Institution of Electrical Engineers*. Ces organisations bénéficient aussi des nombreux titres d'une presse spécialisée qui diffuse les descriptions précises des dernières inventions, auprès des amateurs éclairés. Science et industrie peuvent aussi s'appuyer sur des laboratoires nationaux bien dotés : la Physikalisch Technische Reichsanstalt allemande, le National Physical Laboratory britannique, l'US Bureau of Standards américain, sans oublier le Conservatoire national des arts et métiers et le Laboratoire central d'électricité en France.

5.2 Le déclin des étalons à flamme

Selon Adrien Palaz, la question de l'étalon de lumière se pose ainsi : en laissant de côté les sources stellaires servant de points de comparaison aux astronomes, les sources artificielles de lumière, les lampes, consomment et transforment de l'énergie (chimique par une combustion dans une lampe à flamme, électrique dans une lampe à incandescence ou dans l'arc voltaïque) selon des processus complexes, dépendant de multiples conditions. Maintenir et reproduire toutes ces conditions dans l'étalon de lumière est un véritable défi. Pour les étalons à flamme, il faut s'assurer de l'invariabilité de la hauteur de la flamme, de son épaisseur, ce qui semble possible pour le gaz avec le *bec-bougie étalon* de Giroud, contrôler la pureté du combustible, les propriétés de l'air atmosphérique (température, hygrométrie, taux de CO₂), maintenir une bonne ventilation tout en évitant les mouvements de l'air, etc.

En comparaison, les étalons incandescents, comme l'étalon PLS (platinum light standard), proposé en 1879 par Carl Louis Schwendler (1838-1882)¹⁸ semblent parfaits... En théorie seulement : formé d'un ruban de platine porté à l'incandescence par le passage d'un courant électrique, l'étalon PLS demande un réglage sourcilieux du courant et de la tension qui l'alimente, de façon à maintenir rigoureusement constante la température du ruban, sous peine d'observer des variations considérables de l'intensité rayonnée, comme en témoignent les données (fig. 5.2) rapportées par Zöllner (Johann Karl Frie-

18. C. L. Schwendler, « On a new standard of light », *Phil. Mag.*, 1879, ser. 5, VIII/50, p. 392-403. Sur l'usage du platine dans les étalons photométriques, voir Ian E. Cottingham, « Platinum and the standard of light », *Platinum metals review*, 1986, 30/2, p. 84-95.

drich Zöllner, 1834-1882) : une variation de 20% du courant correspond à une augmentation sans aucune mesure de l'intensité rayonnée.

Intensité du courant électrique.		Intensité de la lumière émise.	
		Rouge.	Verte.
140		300	8
170		8800	4000

fig. 5.2 – Données tirées des travaux de Zöllner, cité par Wiedemann, Procès verbaux de la Conférence internationale des unités électriques, Paris, 1882, p. 126.

De plus, et malheureusement, la structure moléculaire du métal solide incandescent et donc son pouvoir émissif varient dans le temps. Voici ce qu'en dit Jules Violle :

Avec un solide incandescent on évite la plus grande partie des inconvénients. Il semblerait même qu'une lampe à incandescence, recevant une quantité donnée d'énergie, constitue immédiatement un étalon photométrique absolu. Malheureusement, des complications subsistent encore. Pour nous en rendre compte, examinons d'abord rapidement l'étalon Schwendler. Il consiste, comme l'on sait, en une lame de platine, de dimensions déterminées, illuminée par le passage d'un courant électrique d'intensité donnée. L'éclat de cet étalon serait fixe si, au bout de peu de temps, la lame de platine, par suite de l'action même du courant électrique, n'éprouvait un changement de structure physique, une sorte de désagrégation, qui constitue un obstacle contre lequel Edison a échoué tant qu'il a essayé de fabriquer des lampes à incandescence avec des fils de platine.¹⁹

À l'issue du congrès de 1881, la question de l'unité photométrique n'a pas reçu de réponse et la session se termine par cette simple recommandation : « qu'en attendant qu'on puisse indiquer une unité photométrique absolue, il y a lieu de recommander l'emploi de la lampe Carcel (type du service des phares), de préférence à la bougie. »²⁰ Force est donc de rester aux étalons à flamme ! Mais les conditions définies par Dumas et Regnault suffisent-elles à faire de la lumière de la lampe Carcel une lumière type, de niveau international convient-il de préciser, d'autant que ces conditions draconiennes peuvent décourager plus d'un laboratoire étranger ? Il faut à la lampe Carcel

19. J. Violle, « Sur l'étalon absolu de lumière », *ACP*, 1884, sér. 6, tome 3, p. 378-379.

20. Congrès international des électriciens, 1881, [Min82b], p. 337.

des conditions d'utilisation invariables, exigence difficile à satisfaire « car les différences dans la pureté de l'huile et dans la nature des mèches sont une source de difficultés ; aussi cette lampe n'est-elle employée ni en Allemagne, ni en Russie, ni en Angleterre. »²¹ souligne Robert Lenz (1833-1903), le délégué de Russie à la Conférence internationale des unités électriques, réunie à Paris en 1882. Ce à quoi, Broch (Ole Jacob Broch, 1818-1889), le délégué norvégien, répond :

(...) dans un même lieu, à Paris, par exemple, la lampe Carcel est très constante, parce que la mèche et l'huile proviennent toujours d'une fabrication identique. Rien n'empêche d'ailleurs de comparer de temps en temps entre eux les étalons intermédiaires.²²

Ce fait est confirmé par Félix Leblanc (1813-1886), professeur à l'École centrale des arts et manufactures, dont Dumas rappelle qu'il est chargé depuis quinze ans de la vérification du pouvoir éclairant du gaz d'éclairage de la ville de Paris. Si les membres de la troisième section du Congrès des électriciens réunis à Paris en 1881, s'étaient résignés à l'emploi de la lampe Carcel, de préférence à la bougie, c'était sans doute pour éliminer cette dernière des lumières de référence, tout en indiquant que « l'étalon photométrique » défini par Dumas et Regnault ne saurait constituer « l'unité » absolue de lumière. Certes bien adapté à l'éclairage au gaz mais peu exporté à l'étranger, tout au plus pourrait-on le considérer, selon le *Vocabulaire international de métrologie* édité aujourd'hui par le JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology)²³ comme un « étalon national »²⁴. C'est que le domaine de l'éclairage va rapidement s'étendre à de nouvelles sources lumineuses : lampes à pétrole et lampes à incandescence (électriques et à manchon) et la métrologie photométrique utiliser d'autres étalons nationaux, concurremment du Carcel. L'utilisation dans ces nouveaux standards de combustibles volatils, issus de la distillation du pétrole, facilite leur conception par rapport aux étalons brûlant de l'huile : l'ascension dans la mèche s'effectue par simple capillarité, sans l'aide d'une

21. Ministère des Affaires étrangères, *Conférence internationale pour la détermination des unités électriques : 16 octobre - 26 octobre 1882, procès-verbaux*, Paris, Imprimerie nationale, 1882, 145.

22. Conférence des unités électriques, *ibid.*, p. 145.

23. Ce comité chargé de la rédaction du vocabulaire international de métrologie (VIM), du guide des expressions des incertitudes de mesure (GUM) rassemble des membres du BIPM (Bureau international des poids et mesures), de sociétés savantes comme l'IUPAC (Union internationale de chimie pure et appliquée) et d'organisme de normalisation comme l'ISO (International Organization for Standardization).

24. *Vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés*, JCGM, 3^e édition, 2008, p. 47.

pompe ou d'un quelconque mécanisme. Ainsi, en Grande-Bretagne, Augustus George Vernon Harcourt (1834-1919) utilise dans sa lampe la combustion d'un hydrocarbure liquide à faible point d'ébullition, le pentane²⁵. La lumière de cet appareil, qui se décline dans une version métrologique et selon un modèle industriel simplifié, est réputée « plus blanche que celle du gaz d'éclairage et se compare mieux à la lumière électrique. »²⁶ En Allemagne, Friedrich von Hefner-Alteneck (1845-1906) propose comme unité pratique sa lampe à acétate d'Amyle²⁷. La description qu'il en donne le dispute à la précision de Dumas et Regnault :

On emploiera comme unité d'intensité lumineuse, celle d'une flamme brûlant librement et en repos dans l'air atmosphérique pur, donnée par la section droite d'une mèche massive imprégnée d'acétate d'amyle et remplissant exactement un tube cylindrique en maillechort de 8 millimètres de diamètre intérieur sur 8,3 millimètres de diamètre extérieur, et de 25 millimètres de hauteur verticale, la hauteur de la flamme étant de 40 millimètres au-dessus du bord du tube et mesurée dix minutes au moins après l'allumage.²⁸

En 1893, la Physikalisch-Technische Reichsanstalt va publier des conditions d'emploi de l'appareil²⁹ permettant ainsi à la loi allemande d'élever l'intensité « normale » émise par la lampe Hefner au rang d'unité légale, la *bougie Hefner* ou *HK* (*Hefnerkerze*) pour remplacer la *Vereinskerze* ou bougie de l'Union des gaziers allemands. L'influence des facteurs atmosphériques sur l'intensité doit être décrite par des lois empiriques comme celle établie par Liebenthal :

$$y = 1,049 - 0,0055 \cdot x - 0,0072(x' - 0,75) + 0,00011(b - 760)$$

On obtient ainsi une intensité y égale à 1 HK (bougie Hefner) pour un taux d'humidité de l'air exprimé par $x = 8,8$ litres (volume de vapeur d'eau par

25. L'innovation réside ici dans l'utilisation d'un manchon métallique entourant le tube porte-mèche, dont la température permet la vaporisation du pentane plusieurs centimètres au-dessous de la flamme. Le réglage de la hauteur de la mèche n'est donc plus critique. Le tirage est assuré par une cheminée en métal. La flamme peut être observée à travers une fenêtre en mica.

26. Congrès international des électriciens, 1881, [Min82b], p. 126.

27. Il s'agit d'un ester formé par réaction de l'acide acétique ou éthanoïque avec l'alcool amylique, obtenu par fermentation de la fécule de pomme de terre.

28. Célestin Haraucourt, « La lampe Hefner », *Manuel général de l'instruction primaire : journal hebdomadaire des instituteurs*, 63^e année, 1896, tome 32, p. 386-387.

29. Physikalisch-Technische Reichsanstalt, « Die Beglaubigung der Hefnerlampe », *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, Berlin, 1893, vol. 13, p. 257.

mètre-cube d'air), un taux de gaz carbonique $x' = 0,75$ litre (par mètre-cube d'air) et une pression atmosphérique $b = 760$ mm (de mercure)³⁰.

Les nouvelles sources lumineuses à pétrole et à incandescence (soit électrique, soit à manchon réfractaire) bouleversent l'échelle de valeurs des étalons de la photométrie. Les étalons traditionnels qui s'étaient imposés pour le contrôle du gaz seront soit rapidement abandonnés comme la bougie dont l'avantage de la simplicité d'emploi ne peut compenser le désagrément de ses variations soit, comme la lampe Carcel, conserveront encore un temps leur place, mais qu'il faudra partager avec d'autres étalons secondaires et ce tant que la flamme éclairante du gaz sera distribuée dans les villes. Cette fourniture durera quelques années encore, comme le rapporte Pierre Fleury (1894-1976) : « Le règlement de Dumas et Regnault est resté théoriquement en vigueur pour la vérification du gaz fourni à Paris jusqu'en 1920 (date à laquelle on a cessé de mesurer le « pouvoir éclairant » du gaz, qui n'a plus d'intérêt depuis la généralisation de l'emploi des manchons). »³¹

Cette situation qui verrait se multiplier des standards photométriques nationaux, sans que fût définie l'unité de lumière ne saurait cependant perdurer. Mais la volonté d'en sortir est bien là. Le Congrès de 1881, invite les gouvernements à constituer une Commission internationale à effet de « Déterminer un étalon définitif de lumière, et les dispositions à observer dans l'exécution des expériences de comparaison »³². Un espoir se dessine pour cette commission, avec la proposition de Jules Violle d'utiliser la lumière du platine incandescent, à la température de solidification. La question de la valeur de cet étalon décrié d'un côté par les ingénieurs du PTR allemand et d'un autre côté, reconnu comme parfaitement valable par Joseph-Ernest Petavel (1873-1936) du NPL britannique mérite le développement à suivre.

5.3 Étalon Violle

La question de l'unité « absolue » de lumière est double : sa définition demande en premier la réalisation matérielle et la conservation de son étalon, ce qui fait appel à toutes les ressources de la science contemporaine. Il faut en second définir une unité pratique, utilisable dans tous les secteurs d'activité. Au Congrès des électriciens, tenu à Paris en 1881, Jules Violle propose d'utiliser « la lumière émise par un centimètre carré de platine pris à la température de fusion de ce métal. » Cette lumière présenterait l'avantage

30. E. Liebenthal, op. cit. [Lie07], p. 121.

31. P. Fleury, *Encyclopédie photométrique*, troisième section, *Photométrie visuelle*, tome II, *Étalons photométriques*, Paris, *Revue d'Optique théorique et instrumentale*, 1932, p. 15-16.

32. Congrès international des électriciens, Paris, 1881, [Min82b], p. 150.

de posséder des propriétés proches de celles de la lumière électrique et, en particulier, une intensité du même ordre de grandeur, intensité que ne peut atteindre la Carcel, encore moins la bougie. La fixité de la lumière est assurée parce que la température du métal reste parfaitement constante au cours de son changement d'état. Cela suppose d'utiliser un platine préparé à un haut degré de pureté. Cette température de fusion a été déterminée par Violle avec une bonne précision. Il expose ainsi les motifs de sa proposition :

Au cours des expériences que je viens de rappeler, j'avais été frappé par la beauté et la fixité de la lumière qu'émet un bain de platine liquide. Aussi, lorsque la question d'un nouvel étalon de lumière fut soumise au Congrès international des électriciens, réuni à Paris en 1881, je proposai de prendre pour étalon un centimètre carré de platine à son point de fusion, c'est à dire une portion déterminée de la surface d'un corps toujours identique à lui-même et émettant sans flamme une lumière éclatante dont l'invariabilité est assurée par l'un des principes fondamentaux de la Physique.³³

Reçu en 1861 à l'École normale supérieure, Jules Violle suit les enseignements de Paul Desains à la Faculté des sciences de Paris, lequel a consacré une bonne partie de ses recherches au rayonnement des corps à haute température. C'est Desains qui préside le jury de thèse de Violle « Sur l'équivalent mécanique de la chaleur »³⁴. Les états de service de Jules Violle (annexe E, p.401) montrent les étapes de sa carrière : après avoir enseigné aux lycées de Besançon et de Dijon, il bénéficie de 1867 à 1872 d'un poste d'agrégé préparateur à l'École normale supérieure. C'est pendant cette période qu'il prépare sa thèse soutenue en 1870. Il obtient ensuite un poste de professeur à la faculté des sciences de Grenoble qu'il occupera jusqu'en 1879, avant d'obtenir un autre poste à la faculté de Lyon, où il restera jusqu'en 1884. Il revient ensuite à Paris comme maître de conférence à l'École normale supérieure. Pendant ces années, l'enseignant-chercheur s'affirme comme un spécialiste de l'étude du rayonnement solaire et participe au développement de l'actinométrie en France. Les Alpes dauphinoises deviennent le laboratoire où il effectue de nombreuses mesures du rayonnement solaire. Ses travaux le conduisent à une nouvelle détermination de la *constante solaire*, confirmant la première évaluation réalisée par Pouillet (supra p.99), et lui permettent de fournir une

33. J. Violle, *Notice sur les travaux scientifiques de M. Jules Violle, maître de conférences à l'École normale.*, Paris, Gauthier-Villars, 1889, p. 19-20.

34. J. Violle, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, Thèse, Paris, 1870, Gauthier-Villars.

valeur de la température du Soleil. Les mesures sont délicates car il faut tenir compte du rayonnement diffus, c'est à dire réémis par les molécules des gaz de l'atmosphère et du rayonnement absorbé par ce dernier. Muni d'actinomètres de sa conception (actinomètre à boules métalliques³⁵), Violle effectue plusieurs expéditions : au sommet du Mont Blanc³⁶, en Algérie, dans le désert du Sahara.³⁷ La valeur de ces travaux est reconnue par l'Académie des sciences qui lui décerne, en 1876, le prix Bordin (Charles-Laurent Bordin, 1761-1835).

Les recherches de Violle sur la loi du rayonnement de la chaleur à des températures élevées l'amènent à s'intéresser à la mesure des hautes températures terrestres, en particulier la température de fusion des métaux réfractaires dont les déterminations lui semblent « imparfaites ». C'est ainsi que par une méthode calorimétrique, Violle peut apporter une valeur précise de la température de fusion du platine : dans un bain de platine en fusion, il prélève une « rosette » du métal qu'il immerge dans l'eau d'un calorimètre. La mesure de l'élévation de température, fournit la quantité de chaleur cédée par l'échantillon de platine au calorimètre. Connaissant la chaleur spécifique du métal, on tire la température initiale de l'échantillon, égale à la température de fusion du platine qui s'élève à 1775°C (valeur actuelle admise 1768°C). Dans son principe, le procédé se ramène à la banale *méthode des mélanges*. La difficulté réside notamment dans la détermination préalable des chaleurs spécifiques C des métaux à des températures très élevées dont la mesure n'est pas encore maîtrisée à l'époque. Violle utilise un thermomètre à gaz et est contraint d'arrêter la mesure à 1200°C. Comme il a constaté une variation « linéaire » de C avec la température entre 0°C et 1200°C, il peut obtenir la mesure de C pour des températures plus élevées par extrapolation³⁸. L'ensemble de ses expériences sur la lumière émise par les métaux nobles, portés à haute température³⁹ autorise Violle à proposer son étalon de lumière du platine incandescent au Congrès des électriciens de 1881. Ses arguments sont solides :

Au Congrès international des électriciens en 1881, j'ai eu l'honneur de proposer comme étalon absolu de lumière le platine porté

35. J. Violle, « De la température du soleil », *Journal de physique théorique et appliquée*, 1876, 5 (1), p. 169-179.

36. J. Violle, « Une expédition au Mont-Blanc », *Revue des deux mondes*, 1875, vol. 12, p. 204-216.

37. J. Violle, « Sur le rayonnement solaire », [Vio89], p. 7-14.

38. J. Violle, « Sur certaines températures élevées », [Vio89], p. 14-17.

39. J. Violle, « Sur la radiation du platine incandescent. », 1879, *CRAS*, tome 88, n°4, p. 171-173.

à sa température de fusion. Le phénomène employé ici a l'avantage d'être constant et susceptible de se reproduire toujours identique à lui-même. Le point de fusion est pour chaque corps une constante parfaitement déterminée : tant qu'une certaine quantité de liquide reste mêlée aux portions déjà solidifiées, la température de la masse est invariable. Un métal liquide en voie de se solidifier constitue donc un corps à température fixe. Si, en outre, ce métal, comme le platine, est inaltérable, il aura toujours le même pouvoir émissif. Sous une surface donnée, il émettra toujours la même quantité de lumière. La qualité de cette lumière dépend de la température : le platine, étant le plus réfractaire des métaux usuels, sera celui qui, à son point de fusion, donnera la lumière la plus blanche. Il s'impose donc pour la constitution de l'étalon absolu.⁴⁰

Violle reçoit un appui important en la personne de Jean-Baptiste Dumas. L'académicien octogénaire — Violle n'a, quant à lui, qu'une quarantaine d'années — possède une autorité incontestable, reconnue par le gouvernement qui, « en reconnaissance pour les éminents services qu'il venait de rendre à la science », l'a nommé délégué plénipotentiaire représentant la France à la Conférence diplomatique qui, le 20 mai 1875, a établi la Convention du mètre⁴¹. Au congrès de 1881, Dumas a émis le souhait « que l'on adoptât une unité nouvelle pour les grands foyers lumineux ; M. Violle [ajoute Dumas], par exemple, en a proposé une, qui est raisonnable, mais qu'il faudrait matérialiser. »⁴² Mais si l'idée de Violle apparaît pertinente pour juger de l'intensité de l'arc voltaïque, elle ne dégage pas encore suffisamment de suffrages pour être adoptée à l'issue du congrès de 1881. Lorsque se réunit la Conférence internationale des unités électriques en octobre 1882, Dumas doit encore se faire le porte-parole de Violle pour proposer son étalon fixe.

M. Dumas, daignant prendre cette proposition sous son haut patronage, a appelé sur elle l'attention de la Conférence internationale pour la détermination des unités électriques, et M. le Ministre des Postes et des Télégraphes a bien voulu me donner l'ordre d'étudier à nouveau la question.⁴³

D'autres lumières sont évoquées, en particulier l'utilisation des lampes à in-

40. J. Violle, [Vio84a], p. 380.

41. Voir à ce sujet Louis Marquet, op. cit. n°14, p. 559-567.

42. Congrès international des électriciens, 1881, [Min82b], p. 358.

43. J. Violle, « Sur la radiation de l'argent au moment de sa solidification », *Journal de physique théorique et appliquée*, 1883, sér.2, tome 2, p. 366.

candescence, au moins comme étalon secondaire pour juger des lampes à arc. Werner von Siemens signale également la fixité de la lumière émise par le charbon positif de l'arc électrique, qui pourrait en faire un étalon convenable. Réaliste, Siemens ajoute : « Pour avoir une bonne lumière, il faut arriver à rendre fixe cette partie extralumineuse du charbon positif. »⁴⁴. À l'issue de cette première session, la question de l'unité de lumière n'est pas encore tranchée et la commission ne peut que recommander des expériences complémentaires. Violle va s'employer à ce travail : « Par ordre de M. le Ministre des Postes et des Télégraphes, je me mis aussitôt à l'oeuvre, dans un des laboratoires de l'École Normale, où M. Debray voulut bien m'autoriser à m'installer. »⁴⁵

L'injonction du ministre Cochery montre toute l'importance que le gouvernement attache à la réalisation et à la conservation des étalons internationaux. Gardienne du mètre et du kilogramme, la jeune république française deviendrait aussi celle de l'unité de lumière. Noble et pacifique ambition pour une nation encore sous le coup de la défaite contre le royaume de Prusse et qui n'aspire qu'à la paix et à retrouver aussi sa grandeur ! Violle, donc, obtempère qui sait qu'il pourra disposer des ressources du laboratoire de chimie de l'École normale supérieure, dirigé par Henri Debray (1827-1888) spécialiste avec Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881) de la métallurgie des « métaux de la mine de platine »⁴⁶. Il semble également avoir porte ouverte chez Matthey (George Matthey, 1825-1913), affineur de métaux précieux à Londres qui lui a « obligeamment » fourni du « platine irréprochable »⁴⁷.

Un copieux mémoire publié en 1884 dans les *Annales de chimie et de physique* rassemble l'ensemble du travail de Violle sur « l'étalon absolu de lumière ». Sur les conseils de Dumas, Violle se livre d'abord à des expériences préparatoires sur l'argent pour vérifier la « constance de la radiation pendant la solidification »⁴⁸. Il utilise une thermopile reliée à un galvanomètre à cadre mobile dont la déviation est l'image de la température de la surface du métal en fusion. La thermopile est placée à l'intérieur d'une

44. Conférence internationale des unités électriques, 1882, [Min82a], p. 129.

45. J. Violle, [Vio84a], p. 381.

46. On appelle ainsi les métaux dont les minerais appartiennent aux mêmes roches que le minerai de platine. On trouve ainsi dans la mine de platine l'iridium, l'osmium, le palladium, le rhodium le ruthénium.

47. C'est chez Johnson & Matthey qu'a été finalement commandé l'alliage de platine et d'iridium dans lequel ont été confectionnés les prototypes du kilogramme et du mètre étalon en 1877. En effet, la première coulée de l'alliage effectuée au Conservatoire des arts et métiers, en 1874, ne s'était pas placée entre les limites de tolérance fixées par la Convention du mètre.

48. J. Violle, [Vio84a], p. 381.

double enveloppe en laiton, refroidie par un courant d'eau, l'ensemble étant posé sur une brique réfractaire épaisse. Un trou est percé dans cette brique et dans le fond de l'encainte en laiton. Cette ouverture fait communiquer la thermopile avec le rayonnement du bain métallique. Dans une première

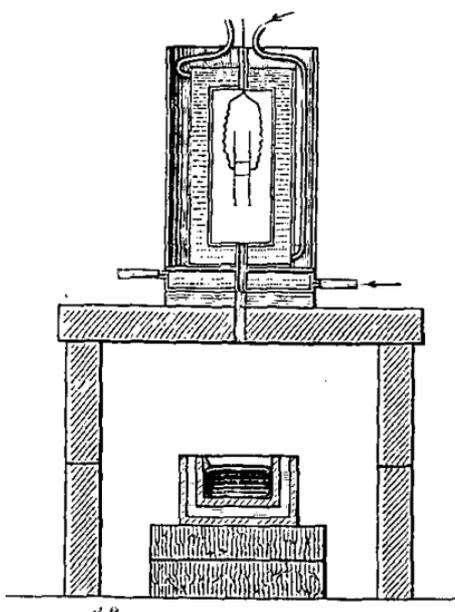


fig. 5.3 – Montage pour la vérification de la constance de la radiation pendant la solidification de l'argent pur, Tiré de Violle, « Sur l'étalon absolu de lumière », *ACP*, Paris, 1884, sér. 6, tome 3, p. 382.

expérience, l'argent fondu, contenu dans une boîte à double enveloppe, se refroidit lentement et le signal de la thermopile est représenté par le profil de gauche (figure 5.4). Dans la seconde expérience, le métal est surchauffé au-dessus du point de fusion puis laissé se refroidir rapidement dans un « vase simple » ; la thermopile donne le profil de droite. Les expériences réalisées dans des conditions différentes montrent, dans les deux cas, l'existence, entre les points A et B, du même palier de température du bain métallique où co-existent les deux phases liquide et solide. Dans cet intervalle, le rayonnement de la surface métallique peut être considéré comme constant. Les expériences photométriques, réalisées ensuite par Violle sur le platine fondu lui semblent suffisamment concluantes pour donner cette définition de l'unité lumineuse :

Je prends comme unité absolue de lumière la radiation émise par

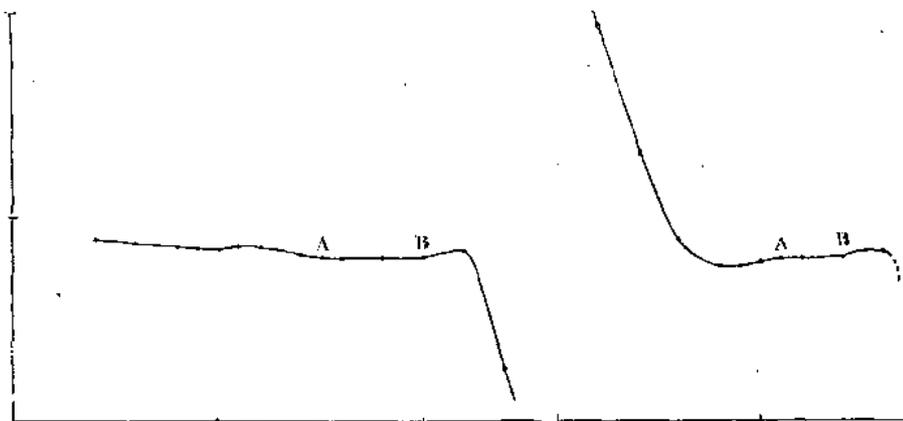


fig. 5.4 – Profil de la température pendant la solidification de l'argent pur. Les déviations du galvanomètre sont notées de demi-minute en demi-minute. Tiré de Violle, *ibid.* p. 382.

une surface d'un centimètre carré de platine fondu à la température de solidification.⁴⁹

Il peut alors réaliser l'étalonnage de la lampe Carcel choisie, lors de la session précédente de la Conférence des unités électriques, comme étalon provisoire et qui pourra alors prétendre au rang d'*étalon secondaire*. Mais la comparaison d'une lumière à celle d'un étalon, quel qu'il soit, consiste en toute rigueur, ainsi que l'explique Violle,

à les décomposer toutes les deux au moyen d'un prisme et à mesurer l'intensité de chacune des couleurs du spectre de la lumière proposée relativement à l'intensité de la même couleur dans le spectre de la lumière étalon. On a ainsi une série de nombres définissant les intensités respectives des diverses radiations simples de la source considérée. Dans le cas seulement où tous ces nombres seront égaux, l'intensité lumineuse pourra se représenter par un nombre unique, la source étant alors de même espèce que l'étalon.⁵⁰

Violle s'est déjà livré à de telles mesures avec un spectrophotomètre, sur une lampe consommant 42 g d'huile par heure, autour des raies C ($\lambda = 656$), D ($\lambda = 589, 2$), E ($\lambda = 527$) et F ($\lambda = 486$)⁵¹. Il se contente d'ajouter :

49. J. Violle. « Sur l'étalon absolu de lumière. », *Journal de Physique théorique et appliquée*, 1884, 3 (1), p. 242.

50. Violle, [Vio84a], p. 397.

51. Les valeurs sont données en millièmes de micromètre.

La lumière de la lampe Carcel n'a pas la même composition spectrale que la lumière émise par le platine à son point de solidification. Toutefois la divergence est assez faible pour qu'au photomètre Foucault il n'y ait pas de différence de teinte sensible entre les deux moitiés de l'écran respectivement éclairées par les deux lumières : il est donc possible de déterminer la grandeur pratique de la lampe Carcel en fonction de l'étalon.⁵²

Sans doute s'agit-il ici de ne pas rendre la procédure d'étalonnage d'un simple étalon pratique plus difficile que nécessaire, d'autant que l'analyse spectroscopique demande une optique coûteuse dont ne disposent pas tous les laboratoires d'essai. L'analyse spectrale de Violle sur l'étalon au platine apporte un argument supplémentaire en sa faveur : la richesse de sa lumière en composantes situées à l'extrémité violette du spectre visible, ce qui le rend adaptable à la caractérisation des foyers de grande intensité.

Le platine placé dans un creuset en chaux est fondu dans le four avec un chalumeau *oxyhydrique* brûlant un mélange d'hydrogène et d'oxygène, selon le système développé par Debray et Sainte-Claire Deville⁵³. La surface rayonnante est limitée par un diaphragme (D sur la figure 5.5), incliné à 45° , refroidi par un courant d'eau (dont l'entrée et la sortie sont respectivement situées en A et en A' sur la figure 5.5). La lumière rayonnée par le métal en fusion est reçue sous une incidence de 45° , sur l'écran d'un photomètre de Rumford (P sur la figure 5.5), construit par Sautter (Louis Sautter, 1825-1912) et Lemonnier (Paul-Hippolyte Lemonnier, 1836-1894) pour le Service des phares. La lumière de la lampe L en étalonnage y parvient sous incidence normale. Violle a également prévu une autre configuration de son banc photométrique : la lumière rayonnée normalement à la surface du bain de platine est réfléchiée dans la direction horizontale par un miroir incliné à 45° . Elle est comparée à la lumière d'une lampe Carcel du « Bureau central d'essai ». Les deux lumières sont ainsi toutes deux reçues, sous incidence normale, sur l'écran d'un photomètre de Foucault. Le banc de mesure est identique à celui construit par Deleuil pour la vérification du pouvoir éclairant du gaz de Paris (voir Annexe F, fig. F.1). Violle énonce ainsi les nombres d'un premier étalonnage de la lampe Carcel réalisé sur le banc arrangé selon la première configuration :

52. Violle, *ibid.*, p. 397.

53. Violle utilise aussi un mélange d'oxygène et de gaz d'éclairage, mais Petavel souligne que ce dernier ne peut être envisagé comme combustible car les produits de sa combustion pourraient souiller la surface du platine (voir Fleury, p. 56).

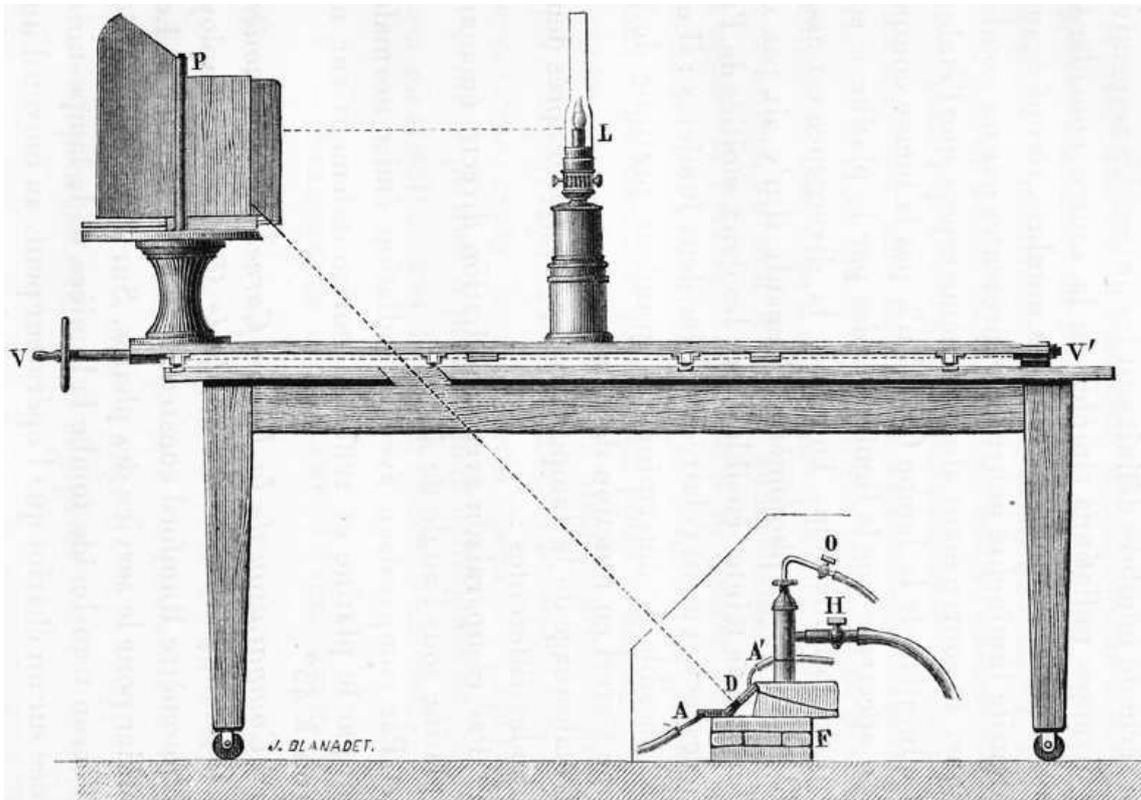


fig. 5.5 – Réalisation de l'étalon Violle. Tiré de Violle, [Vio84a], p. 398.

« Nous appellerons

S la surface utile du platine ;

D la distance de cette surface au photomètre ;

d la distance de la lampe au photomètre ;

p le poids d'huile brûlée par la lampe eu une heure.

Par ce premier procédé on a trouvé, comme moyenne de deux expériences successives :

$$S = 3^{eq},$$

$$D = 1792^{mm},$$

$$d = 752^{mm},$$

$$p = 42^{gr},$$

$$L = 0,791C.$$

De ces nombres, en tenant compte de l'obliquité de la lumière fournie par le platine, on tire pour la valeur de la lampe Carcel normale $C = \frac{I}{2,118}$ »⁵⁴. La moyenne de tous les essais réalisés par Violle fournit une valeur légèrement

54. La lampe L du banc est d'abord comparée à la lampe Carcel dite « normale » qui

inférieure :

$$C = \frac{I}{2,08}$$

Pour que la comparaison ait un sens, il faut encore calculer ce que Violle appelle « l'intensité intrinsèque » de l'étalon calculée pour une surface égale à celle de la flamme de la lampe Carcel que Violle évalue à 5,25 cm². Il parvient ainsi à 10,92 carcels soit « à très peu près 11 fois celle de la lampe Carcel »⁵⁵.

Violle poursuit sa campagne d'étalonnages sur les foyers électriques et en particulier les lampes à incandescence. Il fournit les résultats pour une lampe Swan à filament en fibres de cellulose, alimentée par une batterie d'accumulateurs de Kabath. La puissance électrique absorbée par la lampe peut être réglée par une résistance intercalée dans le circuit. La tension aux bornes de la lampe est voisine de 48 volts, l'intensité consommée reste comprise entre 0,8 et 0,9 ampère. Le pouvoir éclairant « E » de la lampe Swan a préalablement été mesuré par comparaison avec la lampe Carcel, pour différents réglages de la puissance « *ie* » absorbée. Les comparaisons photométriques entre la lampe Swan et la lumière du platine ont été ensuite réalisées par trois observateurs différents à l'aide d'un photomètre de Bunsen. Le rayonnement émis par le platine était rabattu dans la direction horizontale par un miroir à 45° dont le pouvoir réflecteur était évalué à $\frac{1}{r} = 1,204$. L'intensité moyenne de la lumière émise par le platine après sa réflexion est trouvée égale à 6,804 C. Comme la surface utile du bain pour ces essais est de 3,96 cm², on a :

$$6,804 \times C = 3,96 \times 1,204 \times I$$

d'où l'intensité de la Carcel normale, exprimée en unité absolue :

$$C = \frac{I}{2,069}$$

valeur très proche des estimations précédentes.

Du 23 avril au 3 mai 1884 se déroule au Ministère des affaires étrangères, à Paris, sous la présidence d'Adolphe Cochery, la deuxième session de la Conférence internationale pour la détermination des unités électriques. Dès le début de la séance du 30 avril rassemblant les membres de la troisième commission en charge de « l'étalon de lumière », le président Broch invite Jules Violle à présenter l'étalon au platine, exposé qui se termine par ces

sert de référence. Puis l'intensité I émise par le platine (prise pour intensité « absolue ») est comparée à la lumière de la lampe L. Lire Violle, [Vio84a], p. 399.

55. Violle, *ibid.*, p.403.

mots : « par sa constance et la qualité de sa couleur, la radiation émise par une surface de platine fondant satisfait parfaitement aux conditions formulées par la Conférence. » Autrement dit, l'étalon répond parfaitement au cahier des charges tel qu'il avait été défini à l'issue de la première session de la Conférence, en 1882.

Le nouveau *type* est aussitôt confronté à d'autres propositions. Abney, membre du Comité réuni par l'Association britannique, en charge d'établir le type définissant la lumière « blanche » déclare d'emblée qu'« il n'aime pas le platine ». Il précise que c'est en raison de la difficulté de se procurer ce métal en quantité suffisante à un haut degré de pureté. Il préconise l'emploi de lampes à incandescence bien construites, susceptibles de fournir plus facilement une lumière blanche, possédant un spectre équivalent au platine en cours de solidification. Le Britannique apporte un argument de poids : le standard qu'il propose serait relié directement aux unités électriques et donc aisément reproductible. Il se fait fort de diffuser une méthode permettant d'obtenir, par de simples réglages électriques, les différentes qualités des lumières les plus courantes. Wiedemann (Eilhard Ernst Gustav Wiedemann 1852-1928) évoque, quant à lui, la question des mouvements de convection à l'intérieur du bain métallique : les parties les plus froides remontent en surface et sont susceptibles de modifier la température de celle-ci. Mais ces mouvements n'ont pas été mis en évidence par Violle dont l'étalon reçoit la faveur de Ole Jacob Broch et de William Thomson Lord Kelvin, ce dernier déclarant :

M. Violle a réussi à démontrer parfaitement que la surface du platine en fusion a une constance assez grande pour donner lieu à un système d'unité de lumière. Sans doute il a eu à vaincre pour cela de grandes difficultés, qui arrêteraient beaucoup d'autres observateurs. Mais personne n'a indiqué une autre source présentant une constance aussi grande. Le bain de platine est comme la colonne de mercure, à laquelle on doit avoir recours pour définir sûrement l'unité de résistance. Il serait difficile, il est vrai, de répéter les expériences de M. Violle ; mais ce savant a étalonné le bec Carcel et a commencé la même opération pour d'autres sources usuelles de lumière.⁵⁶

Enfin, après trois heures de débats et conformément à la préconisation de Violle, l'unité de lumière se trouve ainsi définie :

56. Conférence internationale des unités électriques, seconde session, Paris, 1884, comptes rendus des travaux, p. 111.

« L'unité de lumière simple est la quantité de lumière de même espèce émise en direction normale par un centimètre carré de surface de platine fondu à la température de solidification.

« L'unité pratique de lumière blanche est la quantité totale de lumière émise par la même source. »⁵⁷

Cette définition en deux points, « lumière simple » et « lumière blanche », montre la difficulté de fournir à l'unité de lumière une définition générale. C'est Helmholtz qui, au cours des discussions précédentes, a soulevé la difficulté : l'intensité ne peut être définie de façon absolue que pour une lumière d'une « réfrangibilité » déterminée, comprendre, en langage présent : une lumière monochromatique de longueur d'onde déterminée. Et le Berlinoise de préciser encore le distinguo entre « unité scientifique » à réserver aux lumières monochromatiques et « unité pratique », seul terme applicable aux lumières blanches ordinaires. Mais l'essentiel est réalisé et Adolphe Cochery, le représentant du gouvernement français à la Conférence exprime sa satisfaction :

L'œuvre de la Conférence est achevée, et heureusement achevée. Les vœux exprimés par le Congrès des électriciens de 1881 reçoivent pleine satisfaction.

(...) aujourd'hui, nous venons de déterminer les deux unités [l'Ohm et l'unité de lumière] réclamées par le Congrès.

Il appartient aux différents États qui ont été représentés à cette Conférence, de sanctionner votre œuvre.⁵⁸

La satisfaction affichée par les autorités ne doit néanmoins pas masquer les difficultés que va rencontrer l'étalon Violle, en particulier pour sa reproduction. Dans sa préface à l'ouvrage de Pierre Fleury consacré aux « Étalons photométriques », Charles Fabry exprime sa désillusion :

Dès 1884, Violle avait cru trouver une solution, un peu simpliste, de ce problème ; l'échec de cette tentative, d'autant plus retentissant que la croyance en une solution définitive avait été plus hautement proclamée, avait découragé pour longtemps les physiciens tentés de s'engager dans la même voie.⁵⁹

57. Conférence internationale des unités électriques, seconde session, *ibid.*, p. 115.

58. Conférence internationale des unités électriques, *ibid.*, 25.

59. Charles Fabry, préface à Pierre Fleury, *Étalons photométriques, Encyclopédie photométrique*, troisième section *Photométrie visuelle*, Tome II, Paris, Éditions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*, 1932, p. vii-viii.

Jugement très sévère sur une solution pourtant validée par des autorités scientifiques, au premier rang desquelles Hermann von Helmholtz et William Thomson Lord Kelvin, mais opinion qui incite à s'interroger sur la valeur *heuristique* de l'étalon Violle. Dans le chapitre qu'il consacre aux étalons photométriques, Walsh du National Physical Laboratory dit de l'étalon Violle ceci :

*The Violle standard, on account of its obvious theoretical advantages, has been regarded as a promising advance on the existing flame standards, and unsuccessful attempts have been made at various times to place it on a satisfactory basis.*⁶⁰

En théorie, l'étalon Violle est une avancée significative sur les étalons à flamme mais les tentatives, en divers lieux et à diverses époques, d'obtenir les conditions satisfaisantes de sa reproductibilité n'ont pas été réunies, selon ses détracteurs, pour le rendre utilisable. On peut alors se demander pourquoi l'unité de lumière proposée par Violle et acceptée lors de la conférence de 1884 ne sera par remise en cause pendant toute la décennie. En 1889, à l'occasion de l'Exposition universelle, se réunit une nouvelle fois, à Paris, le Congrès international des électriciens. Le 27 août sont rassemblés pour la deuxième journée les membres de la première section « Unités et mesures » et Violle est en mesure de proposer

que la bougie employée dans les mesures électriques comme étalon photométrique usuel soit prise égale au $\frac{1}{20}$ de l'unité absolue de lumière adoptée par la conférence internationale de 1884. Cette bougie, très voisine de celles dont on se sert couramment, et sensiblement égale au dixième de la Carcel, se nommerait la *bougie décimale*.⁶¹

La proposition mise aux voix est adoptée à l'unanimité. Même si la délégation française était importante à ce congrès, on peut encore s'étonner qu'aucune remarque ne fût formulée à cette occasion par des personnalités étrangères. William Henry Preece (1834-1913), de la délégation britannique, proposera même, lors de la séance suivante, de « prendre pour unité d'éclairage, sous le nom de *lux*, l'éclairage produit par une lampe Carcel à une distance de 1 m ; pratiquement le même éclairage que celui qui est fourni par une bougie anglaise à 1 pied de distance. »⁶² Adrien Palaz, défenseur de l'étalon Violle, écrit :

60. John W. T. Walsh, [Wal26], p. 131.

61. Congrès international des électriciens, Paris, 1889, Comptes rendus des travaux, p. 143.

62. Congrès international des électriciens, *ibid.*, p. 163.

Ce reproche[à l'encontre de l'idée de Violle] consiste principalement à dire que l'étalon Violle est d'une reproduction difficile et que, lorsqu'on se décide à y avoir recours, les résultats que l'on obtient ne sont nullement conformes à ceux qui ont été constatés par la commission internationale de 1884.

Or, des divers savants qui ont soumis l'étalon absolu à des recherches complètes, aucun ne s'est entièrement conformé aux prescriptions recommandées par M. Violle.⁶³

Et le Suisse de citer d'abord le travail de Siemens. À peine la Conférence des unités électriques avait-elle clôturé ses travaux, le 3 mai 1884, que ce dernier, dans une note adressée à l'Académie des sciences de Berlin, le 15 mai suivant, exposait la « disposition destinée à reproduire l'unité de lumière adoptée par la Conférence parisienne pour l'évaluation des unités électriques »⁶⁴. Siemens qui a défendu « la belle idée du platine fondant » propose une réalisation plus pratique et plus économique de l'étalon par l'observation de la lumière émise pendant la fusion d'un fin ruban de platine, chauffé par un courant électrique. D'une largeur de 5 mm et d'une épaisseur d'à peine 0,2 mm, le ruban est observé à intervalles réguliers à travers une petite ouverture de 0,1 cm². Au moment de la fusion, l'intensité lumineuse mesurée est donc égale à 0,1 unité Violle. Il semble qu'au Physikalisch-Technische Reichsanstalt, en Allemagne, on place beaucoup d'espoir dans les recherches de Siemens pour reproduire, à peu de frais, l'étalon de lumière et pour éviter que l'idée de Violle ne devienne « une suggestion sans utilité pratique » :

*Nach Siemens soll statt des erstarrenden Platins zur leichteren praktischen Verwirklichung Platinblech im Moment des Schmelzens strahlen. So lange es indessen nicht gelingt, grosse Platinbarren in Kalktiegeln elektrisch zu schmelzen, wodurch vielleicht jegliche Verunreinigung des absolutrein zu haltenden Platins vermieden und in günstigen Fällen wirklich eine glatte und saubere Oberfläche erhalten werden kann, scheint auch die Violle'sche Lichteinheit ein Vorschlag ohne praktischen Nutzen zu bleiben.*⁶⁵

63. A. Palaz, « Nouveau modèle de l'étalon Violle », *La Lumière Électrique*, Paris, 1889, tome 34, n°41, p. 51.

64. W. von Siemens, « Ueber eine Einrichtung zur Darstellung der von der Pariser Konferenz zur Bestimmung der electrischen Einheiten angenommen Lichteinheit », *Annalen der Physik und der Chemie (Wiedemann's Annalen)*, 1884, vol. 22, n°6, p. 304.

65. « Selon Siemens, au lieu d'observer le platine en cours de solidification, une mise en œuvre plus facile consiste à observer le rayonnement d'une feuille de platine au moment de la fusion. Tant que cela n'est pas mis au point, peut-être peut-on utiliser la fusion électrique

Malheureusement pour l'appareil de Siemens, les difficultés de la mesure faite au vol, la fragilité du ruban de platine dont la rupture se produit souvent avant la fusion et d'autres facteurs empêchent toute comparaison précise avec l'unité de Violle. Enfin, une étude plus tardive de Burgess (George Kimball Burgess, 1874-1932) et Waltenberg⁶⁶ montrera une différence notable, pour la radiation rouge, du pouvoir émissif du platine passant de 0,33 lorsque le métal est solide à 0,38 lorsqu'il est liquide, entraînant une erreur systématique dans l'estimation de la brillance de l'étalon Siemens par rapport à celle de l'étalon Violle. Les autres tentatives menées au *P.T.R.* de Berlin pour reproduire l'unité de lumière au platine se soldent par un échec. Mais au lieu de suivre scrupuleusement la méthode de fusion du métal, abondamment décrite par Violle, les physiciens du *P.T.R.* se sont attachés à réaliser la fusion du platine par diverses méthodes électriques, allant même jusqu'à réaliser cette fusion dans le plasma de l'arc électrique et même à remplacer l'un des charbons de l'arc par une électrode en platine.

Petavel, membre de l'*Institution of Electrical Engineers* britannique⁶⁷ fait état d'une unique tentative menée au *P.T.R.* dans l'objectif de réaliser l'étalon Violle dans les conditions originelles. Malheureusement, comme le regrette l'ingénieur électricien, aucun compte-rendu de ces expériences n'a été publié⁶⁸. Petavel résume bien le problème posé par l'étalon Violle :

*Since the adoption of this unit the aim of most of the experimental work on the subject has been not so much to find a suitable method of using the Violle standard as to obtain a substitute for it.*⁶⁹

Et de fait, tous ces essais se traduisent par le remplacement en guise d'étalon de la lumière du bain de platine pur en cours de congélation par celle de la fusion d'un échantillon solide, fil ou ruban, fusion se traduisant par une brusque variation de la lumière émise, *flash* dont la brièveté ne favorise pas une lecture précise sur les instruments. En 1894, Otto Lummer (Otto Richard

de lingots de platine dans des creusets en chaux pour éviter la contamination du platine qui doit rester absolument pur et même dans les cas favorables où une surface vraiment lisse et propre peut être obtenue, l'unité lumineuse de Violle semble rester une suggestion qui n'a aucune utilité pratique. » (ma traduction) Die Thätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in den Jahren 1891 und 1892, *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, Berlin, Verlag von Julius Springer, 1893, vol. 13, p. 120.

66. G. K. Burgess, R. G. Waltenberg, « The Emissivity of Metals and Oxides », *Bulletin of the Bureau of Standards*, 1915, vol. 11, p. 599.

67. La nécrologie de Petavel a été rédigée par Robert Robertson, *Obituary Notices of the Fellows of the Royal Society 1936-1938*, London, 1945, Vol. 2, p. 183-203.

68. J. E. Petavel, « An experimental research on some standards of light », *Proceedings of the Royal Society of London*, 1899, vol. 65, p. 482.

69. J. E. Petavel, *ibid.*, p. 481.

Lummer, 1860–1925) et Ferdinand Kurlbaum (1857–1927) vont proposer un nouveau standard de lumière utilisant la lumière du platine émise cette fois à une température inférieure à celle de la fusion⁷⁰. L'introduction de leur publication rappelle qu'à contrario des unités électriques, on ne peut parler d'unité absolue pour la lumière car ses effets physiologiques ne peuvent être exprimés dans le système absolu des unités C.G.S.. Elle rappelle également la distinction à faire entre *unité technique*, « *technisches Lichtmaas* » et *unité physique*, « *physicalische Lichteinheit* ». La constance de température du métal est contrôlée en s'assurant, à l'aide d'un bolomètre que la quantité de rayonnement transmise par une épaisseur d'eau de 2 cm représente 10% du rayonnement total. Dans son étude critique des standards lumineux, Petavel rappelant les caractéristiques que doit posséder un tel « standard » émet sur le procédé Lummer-Kurlbaum une opinion mitigée :

*The adjustment of the temperature of the platinum foil with the required degree of precision is, however, most tedious, and in fact all but impossible, except under the most favourable conditions. This consideration, together with the complicated nature of the apparatus, render this light impracticable as a working standard. At the beginning of the present paper it has been pointed out that a standard must be constant, reproducible, and must emit light of a suitable colour. We have just seen that the source of light under consideration may be regarded as fulfilling the first of these conditions; with regard to the second and third, the conclusions are less favourable. (...) We are thus driven to the conclusion that this light does not possess all the qualities required of a primary standard. Under certain circumstances it may be of the greatest value as a standard of reference.*⁷¹

Selon Petavel le standard de Lummer et Kurlbaum en dépit de ses inconvénients peut néanmoins constituer un étalon secondaire parfaitement acceptable justifiant son utilisation au Reichsanstalt pour vérifier les lampes Hefner, vérifications que leur impose leur statut d'unité légale en Allemagne et d'étalon pratique selon les prescriptions du Congrès des électriciens, réuni à Genève en 1896. La lampe Hefner est pourtant loin d'être parfaite : le réglage de la hauteur de flamme est critique, son intensité est un peu faible et, comme pour tous les étalons à flamme, elle dépend fortement des conditions

70. O.Lummer, F. Kurlbaum, « Bolometrische Untersuchungen für eine Lichteinheit », *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, Berlin, 1894, vol. 11, p. 229-238.

71. Petavel, [Pet99], p. 478-480.

atmosphériques, en particulier des teneurs en vapeur d'eau et en gaz carbonique, enfin son rayonnement est trop riche en radiations rouges, ce qui n'en fait pas la source de comparaison la plus adaptée aux lumières électriques.

Il semble bien que l'unique étude sérieuse de la reproductibilité de l'étalon Violle ait été menée par Petavel, sans doute au Davy-Faraday Laboratory de la Royal Institution, si l'on se réfère à la nécrologie rédigée par Robert Robertson. Le rapport de Petavel explore l'ensemble des difficultés rencontrées et propose les remèdes à y apporter. Il réalise de nombreux essais sur la *piste électrique* suivie en Allemagne pour amener le platine à la température de solidification. Il faut renoncer à placer le platine dans un creuset en carbone chauffé par un intense courant électrique car, malheureusement, aux températures espérées, le métal se combinerait au carbone pour former des carbures polluant irrémédiablement le platine en fusion. L'idée de fondre le platine dans la chaleur de l'arc électrique est également écartée en raison de l'action chimique du carbone à de telles températures.

L'ingénieur électricien propose de faire fondre le platine directement par le courant électrique qui le traverse et a conçu l'appareil représenté figure 5.6. Le courant fourni par une batterie d'accumulateurs traverse un barreau de platine A , posé dans un creuset en chaux L et relié aux bornes de la batterie par des conducteurs en cuivre de très grosse section T_1 et T_2 et d'une rigole remplie de mercure, où plongent les deux extrémités du cavalier en cuivre D . Ce dispositif fait office de *rhéostat* pour régler l'intensité du courant qui peut atteindre 2000 ampères. Le rapport de Petavel fait état des difficultés rencontrées dans son expérience. La chaleur dégagée par le passage du courant est telle qu'elle provoque la déformation du récipient contenant la barre de platine dont la section conductrice se réduit en certains points. L'augmentation de la résistance électrique qui en résulte provoque une surchauffe du métal, s'accompagnant pour finir d'une violente étincelle de *rupture*. Il faut concevoir un nouveau récipient fait de l'assemblage de plaques de nickel et de mica rainurées pour contenir le platine en fusion. Même si la largeur du canal de platine fondu est réduite à 2 mm, l'expérience est jugée suffisamment concluante pour que Petavel prédise la possibilité de fondre par son procédé électrique des barres dont la section est dix à vingt fois plus grande que celle de son premier essai.

Si la voie électrique semble prometteuse, Petavel n'en projette pas moins la fusion du platine au chalumeau oxyhydrique pour parvenir à une reproduction fidèle de l'étalon Violle. La réalisation scrupuleuse de son programme va demander plusieurs centaines d'essais et trois années de travail. L'étude de la méthode initiée par Violle va conduire Petavel à définir de nouvelles

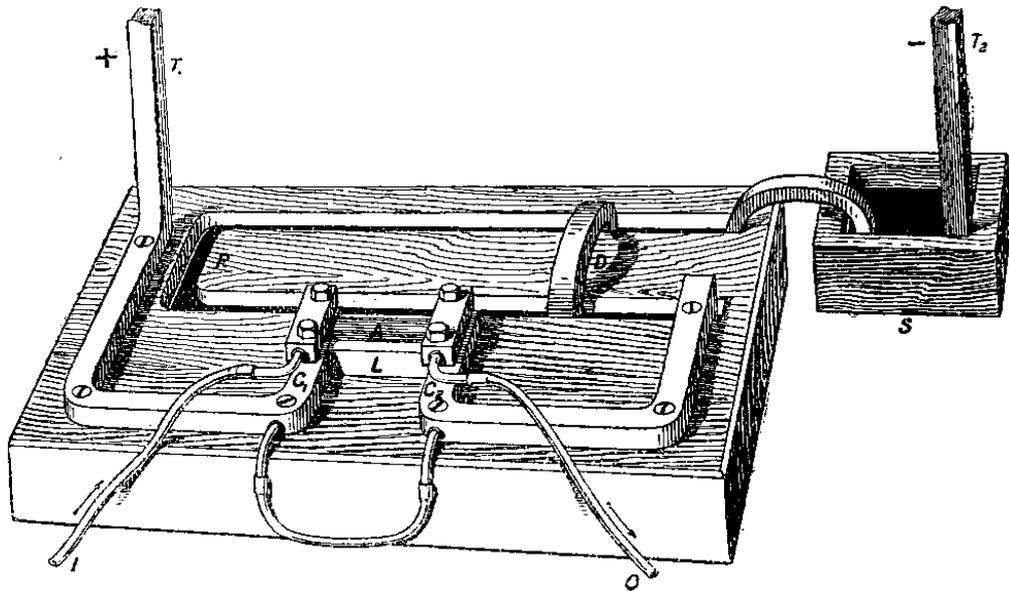


fig. 5.6 – Appareil conçu par Petavel pour effectuer la fusion du platine par le passage d'un courant électrique : *A* barre de platine, *L* creuset en chaux, *T₁* et *T₂* conducteurs de cuivre pleins, *R* rigole remplie de mercure, *D* cavalier de cuivre. Les *clips* *C₁* et *C₂* qui maintiennent le platine sont creux et parcourus par un courant d'eau froide. Tiré de Petavel, [Pet99], p. 484.

conditions de réalisation de l'étalon de lumière, conditions qui ne s'éloignent guère de celles décrites par le Français :

1°/ Le platine doit être chimiquement pur. Pierre Fleury remarque cependant que ni Violle ni Petavel ne donnent la moindre indications sur la nature et la quantité des impuretés tolérées.⁷²

2°/ Le creuset de fusion doit être fait de chaux pure, exempte de silice. On évitera la magnésie et l'alumine qui ne pourront soutenir le platine fondu.

3°/ Le chalumeau oxyhydrique doit brûler de l'hydrogène pur, débarrassé de tout hydrocarbure. L'utilisation du gaz d'éclairage accepté par Violle est à proscrire selon Petavel car sa combustion entraîne la formation d'une pellicule blanche à la surface du platine, à la température de solidification, ce qui modifie la brillance de façon importante (36% selon ce que rapporte Fleury). Il faut brûler les gaz dans la proportion de 4 volumes d'hydrogène pour 3 d'oxygène. On peut tolérer un excès d'oxygène dans le mélange qui permet ainsi l'oxydation et l'élimination des impuretés.

4°/ Il faut impérativement éviter de surchauffer le métal et de provoquer

72. P. Fleury, [Fle32], p. 57.

son ébullition : la condensation du métal vaporisé, sur le couvercle du four provoquerait la chute d'impuretés dans le bain. Le platine fondu doit être refroidi lentement dans une enceinte calorifugée. Les figures F.2 et F.3 en annexe E montrent les systèmes assez semblables de Violle et de Petavel permettant de remplacer, au-dessus du platine, le chalumeau par le diaphragme *D* refroidi par un courant d'eau.

La campagne d'essais de Petavel au Davy-Faraday Laboratory aboutit à la formulation des « *Normal conditions* » définissant les circonstances les plus favorables pour la détermination de l'unité de lumière : le platine utilisé avait la forme d'un disque de 17 cm² de surface et d'une masse de 345 g. Le diamètre du trou pratiqué dans le couvercle du fourneau était de 1,6 cm. Le chalumeau consommait 0,8 pied cube d'hydrogène par minute. Les mesures photométriques se faisaient avec un photomètre de Lummer et Brodhun et utilisaient des lampes à incandescence, alimentées sous une tension de 50 volts, comme lumières de référence. Les pointés photométriques pouvaient être réalisés de 10 s en 10 s grâce à une disposition astucieuse des équipements et l'automatisation de certaines des tâches de l'observateur. La figure 5.7 montre le graphique des résultats de Petavel sur lequel Fleury a reporté les valeurs numériques de la *brillance* du platine en cours de solidification.

En annotant le graphique, Fleury met en évidence plusieurs régions correspondant à différents états du platine : la branche *MN* représente l'époque où le métal est à l'état liquide et se refroidit ; cet état se maintient même alors que la température est inférieure à celle de congélation : c'est le phénomène de *surfusion*. La fin de cet état se manifeste par une brusque augmentation de la « brillance » et la discontinuité marquée entre les points *N* et *P*. Entre les points *P* et *Q*, pendant près d'une minute, les deux phases liquide et solide coexistent et la brillance reste sensiblement constante. La lumière de l'étalon Violle est celle observée dans cette région. Enfin, la partie du graphique entre les points *R* et *S* est celle du refroidissement du platine solide. Entre les points *P* et *Q*, les pointés photométriques sont alignés. En extrapolant cette droite à l'instant du début de la solidification ($t = 80$ s), Pétavel trouve l'intensité de la lumière à la température de solidification, soit 1,002, au lieu de 1,000. Il en déduit que l'erreur de reproductibilité est 0,002.

Le luxe de détails expérimentaux, la quantité de données consignées dans le mémoire de Petavel montrent à l'évidence le souci de faire aboutir la réalisation de l'unité de lumière en suivant la voie tracée par Violle, ce qu'il exprime par cette conclusion :

From the above results I believe I am justified in stating that the

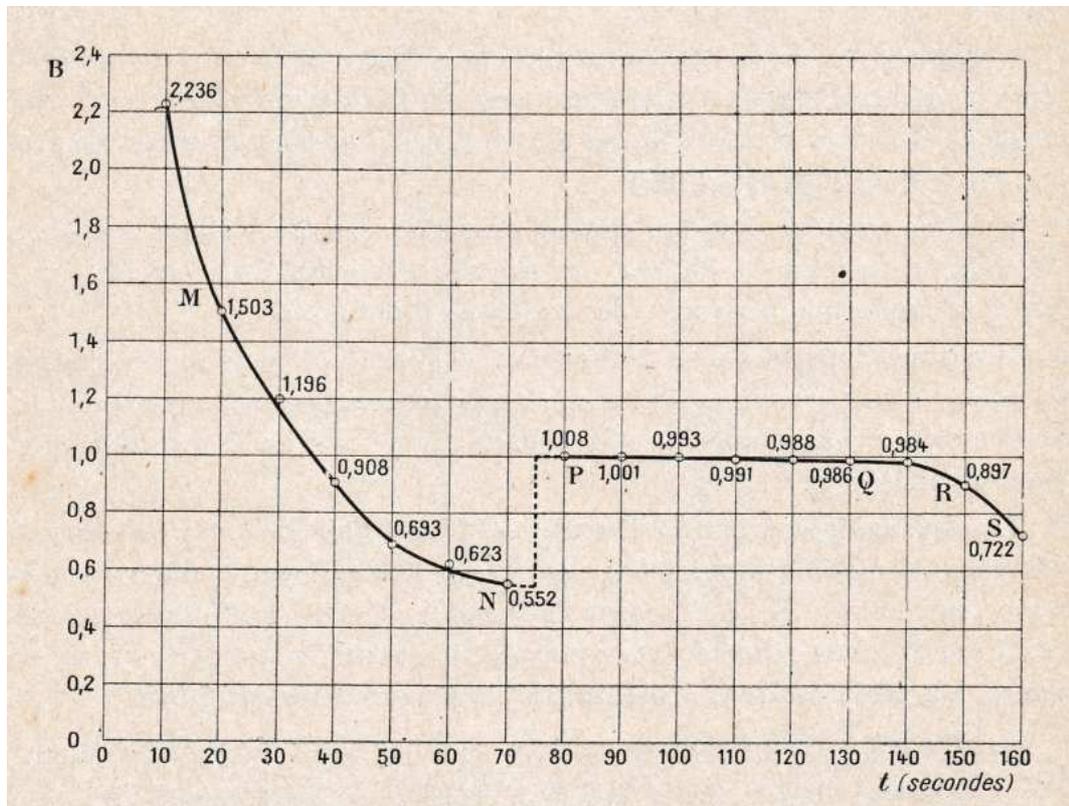


fig. 5.7 – Résultats obtenus par Petavel dans les « conditions normales » : masse de platine, 345 g ; surface, 17 cm² ; diamètre de l'ouverture dans le couvercle du fourneau, 1,6 cm. Intensité de la lumière à la température de solidification, 1,002 (d'où une erreur de 0,002 pour cette détermination). Tiré de P. Fleury, [Fle32], p. 58, d'après Petavel, [Pet99], p. 493.

probable variation in the light emitted by molten platinum under the standard conditions is not above 1 per cent.

With more perfect apparatus, and with the experimental conditions altered in the direction that has been suggested, the accuracy of this standard would certainly be increased.

*Physiological considerations fix a limit to the accuracy of photometric observations. It is not impossible that the accuracy of the platinum standard may attain to or even surpass the limit.*⁷³

L'expertise de Petavel montre, sans doute possible, que l'étalon au platine de Violle est reproductible avec une précision plus qu'acceptable. Si les conditions de sa réalisation sont exigeantes, elles ne peuvent l'être guère moins

73. Petavel, [Pet99], p. 502.

que pour tout standard que l'on souhaite élever au rang d'étalon primaire. Par une curieuse déformation intellectuelle, les experts de la photométrie ont voulu en faire un étalon *pratique*, reproductible à l'infini et même transportable à l'instar des multiples lampes, tant à flamme qu'à incandescence, faisant office d'étalon secondaire, dans les laboratoires municipaux ou industriels. Or Violle, comme le répète un Palaz passablement remonté, n'a jamais conçu l'unité de lumière dans ce but :

Au point de vue pratique, il était évident, de prime abord, que l'étalon absolu ne serait pas employé couramment ; son auteur, le tout premier, n'a jamais songé à en faire un appareil vraiment industriel, et la Conférence internationale, en adoptant la proposition de M. Violle, songeait bien plutôt à l'unification des étalons photométriques, qu'à créer une unité réalisable et utilisable dans les mesures industrielles.

Le fait de créer une unité de lumière internationale donnant des résultats constants, qu'on peut contrôler à chaque instant, en simplifiant ainsi la nomenclature des innombrables étalons photométriques employés auparavant et pourvus d'une sanction plus ou moins légale, ce fait ne constitue-t-il pas en lui-même (...) un progrès sensible et marquant ?

En outre, les recherches de M. Violle n'ont-elles pas donné une nouvelle impulsion aux études photométriques en montrant l'exactitude à laquelle on pouvait atteindre dans l'établissement des étalons photométriques industriels ?⁷⁴

Palaz ne se prive pas de dénoncer, dans les colonnes que lui offre Cornelius Herz (1845-1898) dans la *Lumière électrique*, toutes les opinions préconçues sur l'étalon Violle, en particulier celles exprimées dans les rapports du *Standards of Light Commitee* remis à la British Association, dont il dénonce le parti pris :

On s'est borné à des essais préliminaires faits avec un appareil rudimentaire, et comme les résultats n'étaient pas très bons, ce qui d'ailleurs devait arriver, le comité en a conclu immédiatement au rejet de tout étalon photométrique basé sur la fusion du platine.(...)

74. A. Palaz, « Les étalons photométriques. L'étalon absolu », *La lumière électrique*, 1888, tome 27, n°13, p. 618-623.

Dans l'étude de l'étalon du platine, il semble avoir régné un parti pris qui se retrouve d'ailleurs dans le rapport lui-même. La conclusion du comité « qu'il n'existe pas dans sa conviction, de moyen actuellement connu, permettant d'employer dans des conditions pratiques le platine fondu comme étalon de lumière » est un peu absolu à notre avis...⁷⁵

L'incompréhension à l'étranger de l'étalon Violle et les recherches sans profondeur de solutions de substitution, dont la précision ne pouvait être que médiocre, montrent finalement un certain désintérêt pour le choix de l'unité de lumière, question dont l'urgence n'a rien d'absolue dans la mesure où quelques étalons secondaires, devenus nationaux, font honnêtement le travail... et à moindre frais. André Blondel, dans son rapport sur les unités photométriques, communiqué au Congrès de Genève de 1896, résume bien la situation d'une photométrie qui se trouve à la fin du siècle sans unité de lumière :

Par une singulière anomalie, les décisions de 1884 et de 1889 sont restées à peu près lettre morte en dehors des pays de langue française ; tandis que les unités électriques pratiques étaient acceptées sans opposition partout, le violle et la bougie décimale rencontraient une opposition à peu près irréductible, provenant du prix élevé, de l'emploi difficile de l'étalon et peut-être aussi d'une certaine indifférence.⁷⁶

André Blondel conclut : « Le besoin de remédier à cet état de chose se fait vivement sentir aujourd'hui, à cause du lien plus intime qui s'établit entre la Photométrie et l'Électricité. »⁷⁷.

5.4 L'arc étalon de Blondel

André Blondel, l'auteur de ces lignes, n'a pas vingt ans lorsque s'ouvrent les débats sur l'étalon de lumière au congrès de 1881. La trajectoire du jeune ingénieur mérite une attention particulière, au terme de cette étude, car elle accompagne les progrès de la photométrie dans ces années charnières. Polytechnicien, frais émoulu de l'École des ponts et chaussées (dont il sort major en 1888), Blondel va fermement défendre l'étalon Violle comme unité absolue

75. A. Palaz, « Études récentes sur l'unité de lumière et sur les étalons photométriques. », *La lumière électrique*, 1889, tome 31, n°3, p. 109-120.

76. A. Blondel, « Résumé du rapport sur les unités photométriques », *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, 1896, vol. 13, p. 355.

77. A. Blondel, *ibid.*, p. 355.

de lumière. Louis de Broglie (1892-1987) qui fut l'un de ses biographes dit ceci : « Entré au Service des Phares et Balises, il porta son attention sur les méthodes pouvant servir à l'amélioration des projecteurs de lumières. Cette préoccupation l'amena à étudier non seulement l'optique géométrique, mais aussi la photométrie, science alors peu avancée où la définition même des notions employées restait incertaine. »⁷⁸ C'est au Laboratoire central d'électricité qui vient de s'installer dans ses nouveaux locaux de la rue de Staël à Paris, qu'André Blondel va travailler à la mise au point de ce qui a toujours été dans son esprit un étalon secondaire, destiné à la quantification des lampes à arc qui équipent notamment les phares électrifiés. Les résultats de ses travaux sur l'arc électrique vont faire l'objet de plusieurs communications au prochain congrès de Chicago.

Du 21 au 25 août 1893, à l'occasion de la *Columbian World's Fair* se réunit à Chicago le Congrès des électriciens. Cette nouvelle réunion des électriciens est peut-être l'occasion de s'intéresser à la nature de ce « lien plus intime » entre deux champs disciplinaires aux déploiements si différents : considérable, tant du point de vue théorique que du côté applicatif pour l'électricité ; limité aux évaluations astronomiques et à celles des moyens d'éclairage pour une photométrie qui n'est pas entièrement sortie de l'empirisme et dont le formalisme se réduit aux lois énoncées par Bouguer et aux théorèmes de Lambert déduits de l'optique géométrique. Qu'en deviendra-t-il de la science de la lumière que toutes les réunions précédentes avaient placée, comme une science novice, sous la tutelle de l'électricité ? Si la réunion précédente de 1889, à Paris, ne lui a guère consacré de temps, au moins a-t-elle permis, par la communication d'André Crova, de préciser l'évaluation photométrique des lampes à incandescence.

Les organisateurs du Congrès de Chicago vont répartir les travaux, de façon simple, en trois sections : la section *A* dénommée « *Pure Theory* » ; la section *B* dénommée « *Theory and Practice* » ; la section *C*, enfin, dénommée « *Pure Practice* ». Pour l'électricité, « la standardisation des outils de recherche et de communication »⁷⁹ avance à la vitesse de ses signaux : les travaux de l'Association Britannique ont permis de relier toutes ses unités au « système absolu C. G. S. ». Le système des unités électriques absolues, ainsi défini, a l'avantage de la simplicité tout en générant de la confusion parmi les électriciens peu expérimentés : une *résistance* électrique (unité pratique, l'ohm) s'exprime en unités absolues comme une vitesse, en centimètres par seconde ! L'*inductance* d'une *hélice* s'exprime en unités absolues comme une

78. Louis de Broglie, *Savants et découvertes*, Paris, Albin-Michel, 1956, p. 96.

79. Brigitte Schroeder-Gudehus, « Émergence des congrès scientifiques internationaux au 19e siècle », *Dossier Recherche et rencontre*, 2018.

longueur, en centimètres⁸⁰. Pour éviter les associations troublantes, comme celle d'exprimer une inductance en centimètre ou pire en « quadrant » (selon une décision de 1889), le congrès des électriciens va s'empresse de fournir une identité aux grandeurs magnétiques (champ, induction, flux) qui n'en possèdent pas encore et l'inductance s'exprimera désormais en Henry (du nom de Joseph Henry, 1797-1878). Il ne lui reste plus qu'à procéder à quelques ajustements sur les réalisations matérielles, déjà définies au $\frac{1}{1000}$ voire au $\frac{1}{10000}$, des unités fondamentales de l'électromagnétisme, l'ohm, l'ampère et le volt qui se voient attribuées l'épithète « international ».

Du côté de la photométrie, Blondel souligne la voie différente qu'il faut emprunter pour définir le standard lumineux, au risque même de contredire sa propre idée d'une relation intime entre les deux sciences : la lumière photométrique est un stimulus dont la mesure est, Blondel le déclare haut et fort, physiologique.

It is an error to believe, as is sometimes said, that the unit of light can be defined in an absolute manner, as a function of the ordinary physical elements, and brought in consequence under the C. G. S. system.

Light, considered from the photometric point of view, that is to say, such as we need to measure for practical application, is not a physical quantity, but really a physiological quantity, irreducible into other quantities considered by physicists.

*The unit of light can, therefore, never be defined otherwise than by a concrete standard, and the sole instrument of measurement applicable to photometric determinations, will always be the normally constituted human eye.*⁸¹

Cela posé, il reste à traiter l'épineuse question d'un étalon pratique de lumière, tâche que la « *Chamber of Delegates* » confie à un « *Committee on light* » composé des personnalités suivantes : J. Violle, S. P. Thompson, Nichols (Edward Leamington Nichols, 1854-1937), Budde (Emil Arnold Budde,

80. Cela ne troublera guère les étudiants des siècles à venir : l'esprit formaté dans le système « M.K.S.A. » (mètre, kilogramme, seconde, ampère), beaucoup n'entendront même jamais parler des unités électromagnétiques « uem cgs » et électrostatiques « ues cgs ». Les deux systèmes, l'électrostatique fondé sur la loi de force de Coulomb et l'électromagnétique fondé sur la loi de force d'Ampère sont en cohérence parfaite et reliés par ce que la théorie de la Relativité fera une constante fondamentale : la vitesse de la lumière.

81. A. Blondel, « On the continuous current arc and its employment as a photometric standard », *Proceedings of the International Electrical Congress held in Chicago, 1893*, p. 316-317.

1842-1921), O. R. Lummer et A. Palaz. La demande se fait pressante. Si les experts peuvent toujours recommander la lampe Carcel ou la bougie Hefner pour évaluer la lumière chaude du gaz, la lumière électrique, riche en radiations plus réfrangibles, comme celle des lampes à arc, demande une autre référence. Ces appareils sont souvent utilisés dans les projecteurs destinés à éclairer de vastes espaces publics. Mais, comme le souligne Silvanus Thompson, les performances annoncées par des fournisseurs peu scrupuleux sont à dessein surestimées :

*What was a 1,000 -c.p. [candle.power] lamp? Was it one that only measured 1,000 in one particular direction? It appeared that certain American contractors, not of the first rank, had been in the habit of describing a certain kind of arc lamps of 1,000 c.p., which in fact was far from being such. The law being apparently powerless to deal with such frauds in the absence of any recognised definition of candle-power, decision was asked on the point.*⁸²

La caractérisation photométrique commerciale des lampes à arc n'étant guère possible, en l'absence d'une définition légale du « *Candle Power* », Nichols propose de remplacer la spécification du nombre de « *Candle Power* » par celle de la tension électrique d'alimentation et du courant absorbé. Mais la relation entre les paramètres électriques et le pouvoir éclairant n'étant pas établie, sa motion est rejetée. Or la caractérisation des luminaires à arc électrique, à l'instar de celle des becs de gaz, est autant indispensable à la tranquillité du consommateur qu'à la validation des contrats signés par les villes et leurs fournisseurs de lumière. Si les délégués du congrès peuvent définir des unités qualifiées « internationales » et en recommander l'usage, ils ne peuvent inversement pas accéder à cette demande de standardisation des lampes à arc et établir des règles à visée commerciale qui ne sont pas justement d'une « importance internationale »⁸³. Se pose alors la question de la portée de leurs décisions qui s'inscrivent dans le temps long, sur l'espace supranational mais qui ne peuvent interférer avec les législations nationales, décisions amenées à rester parfois, comme le rappelle André Blondel « lettre morte ». « *But the discussion* », se console Silvanus Thompson, « *served to emphasise the uncertainties which exists in the absence of working methods of measuring colour and of a suitable integrating photometer.* »⁸⁴ Et par là de souligner

82. S. P. Thompson, « The Electrical Congress of Chicago », *The Electrician*, 1893, vol. 31, n° 802, p. 577-579.

83. Proceedings of the Chamber of Delegates, *Proceedings of the International Electrical Congress held in Chicago, 1893*, p. 18.

84. S. P. Thompson, *ibid.*, 579.

les sérieuses lacunes qui persistent dans les expertises photométriques : la question de la couleur des sources, la distribution spatiale de l'intensité et la mesure du rayonnement total.

Le 25 août, Thompson rend les conclusions du « *Committee on light* » lequel ne peut qu'émettre de sérieuses objections sur les étalons à flamme tels que la lampe Hefner ou la lampe au pentane Vernon Harcourt, trop sensibles à la composition de l'air atmosphérique et dont les flammes sont trop faibles ou émettent trop de radiations rouges. Et de demander aux nations de mener les recherches en vue de l'invention d'un étalon pratique de lumière blanche :

*It is, therefore, unable to recommend the adoption at the present time of either the von Heffner lamp or the pentane lamp, but recommends that all nations be invited to make researches in common on well-defined practical standards, and on the convenient realization of the absolute unit.*⁸⁵

Si aucune décision n'est prise au sujet des étalons à flamme, les congressistes vont plutôt se pencher sur la possibilité d'utiliser la lumière émise par le cratère positif de l'arc électrique. Pas moins de sept sur trente-cinq communications importantes vont être consacrées à cette source lumineuse. L'idée d'utiliser la lumière de l'arc électrique comme standard lumineux a donné lieu à plusieurs recherches avant le congrès de Chicago. On a souvent attribué cette idée à William de Wiveleslie Abney. Il en est fait effectivement mention dans le rapport du comité chargé par l'Association Britannique de mener une recherche « *for the purpose of fixing a Standard of White Light* », comité dont les membres sont justement Abney auquel se joignent William Grylls Adams (1836-1915) et Georges Carey Foster (1835-1919). Le rapport qui devait être lu à la cinquantième réunion de l'association tenu à Swansea en août et septembre 1880⁸⁶, se conclut par le résultat suivant :

*It has been found that the 'crater' of the positive pole of the magneto-electric light emits from its central zone a light which is excessively white, and very constant in its component radiations (within limits), the size of the carbon and of the generator being immaterial.*⁸⁷

85. Proceedings of the Chamber of Delegates, [Ame94], p. 19.

86. Une note précise « *This report was not received until after the Annual Meeting, having been delayed by accident.* »

87. *Report of the fiftieth meeting of the British Association for the Advancement of Science; held at Swansea in August and September 1880*, London, John Murray, 1880, p. 119.

En cette fin d'été, Abney ne cache pas les difficultés à surmonter avant de proposer la lumière de l'arc comme standard. Il demande d'étoffer le *Committee* pour des recherches s'inscrivant dans le temps long. Abney, dans ses recherches sur la vision des couleurs, utilisera abondamment la lumière d'une lampe à arc de chez Sautter et Lemonnier, similaire à celles utilisées dans les lanternes des phares électrifiés : « *it [l'arc électrique] gives a steady light and has a constant temperature, as our many measurements of the spectrum illumination showed.* »⁸⁸ Mais il reste à comprendre la stabilité de cette lumière et à évaluer cette température du cratère observé à l'extrémité du pôle positif. Or, en Italie, dans une note publiée en 1879, Francesco Rossetti (1833-1884) attribue à l'extrémité du charbon positif une température de 4000°C et de 3000°C à celle du charbon négatif. Quant à la température de la flamme de l'arc, l'auteur l'estime à 5000°C⁸⁹.

En France, les expériences entreprises par Violle et Tresca (Gustave-Jules Tresca, 1846–1918) montrent aussi la constance du rayonnement émis par le charbon positif, qui ne dépend pas de la puissance fournie par le générateur électrique. Cette constance est vérifiée dans les limites suivantes : de 10 ampères, 50 volts, 500 watts ou 0,7 chevaux-vapeur jusqu'à 400 ampères, 85 volts, 34000 watts ou 46 chevaux-vapeur⁹⁰. Dans les comptes rendus de ces expériences, Violle n'évoque pas l'utilisation de l'arc comme unité lumineuse — il est évident que pour lui, celle-ci est déterminée par l'étalon au platine, selon les décisions des conférences de 1882, 1884 et du congrès de 1889. Pour Violle, l'intérêt de l'arc réside dans un phénomène physique, susceptible d'offrir un nouveau point fixe dans l'échelle des hautes températures : « l'ébullition du carbone ». Violle explique ce qui se passe dans l'arc :

Si donc entre deux morceaux de charbon taillés en pointe et se touchant seulement par cette pointe nous faisons passer un courant, les parties en contact vont s'échauffer, et, si le courant est suffisamment puissant, s'échauffer jusqu'à la température la plus élevée qu'elles puissent supporter.

Admettons que cette température est précisément le point d'ébullition du carbone. Le charbon se réduira en vapeur entre les deux pointes que l'on pourra dès lors séparer ; le courant, passant par la

88. W. de Wiveleslie Abney, E. R. Festing, op. cit. [dWAF86], p. 427-428.

89. Francesco Rossetti, « Sulla temperatura dell'arco voltaico, e delle due estremità polari, positiva e negativa, dei carboni all'atto della produzione della luce elettrica. », *Atti della reale Accademia dei Lincei*, Roma, 1879, ser. 3, vol. 3, p. 250-251.

90. J. Violle, « Sur la température de l'arc électrique », *CRAS*, 1892, vol. 115, p. 1273-1275 et « Light and Heat of the Electric Arc. », *Proceedings of the International Electrical Congress held in Chicago, 1893.*, p. 259-266.

vapeur comprise entre les deux électrodes, persistera, et le charbon continuera à bouillir, distillant du pôle positif au pôle négatif.⁹¹

Selon Violle, l'arc est le siège d'un véritable changement d'état du carbone qui se traduit, comme dans le cas de la solidification du platine, par une température rigoureusement constante qu'il évalue à 3500°C, en utilisant la même méthode calorimétrique que celle qu'il a utilisé pour mesurer la température de fusion du platine.

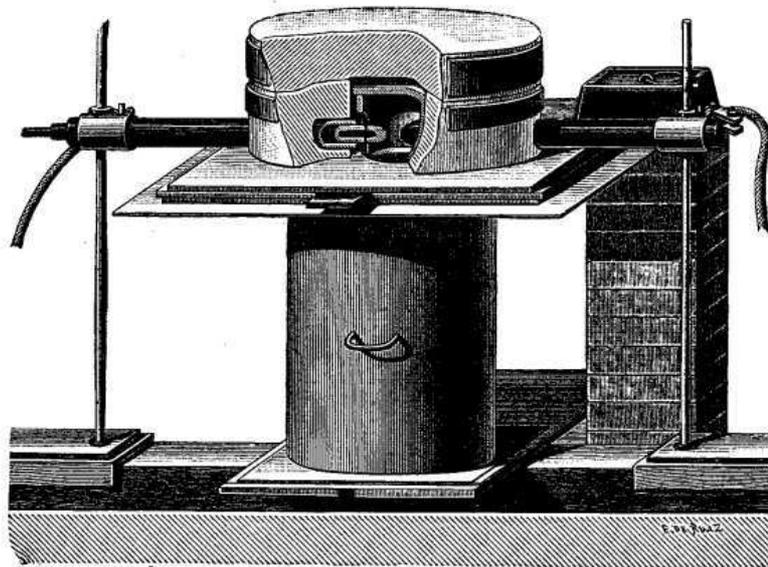


fig. 5.8 – Le four électrique de Violle et Moissan. Remarquer à gauche le charbon évidé permettant d'extraire facilement l'extrémité incandescente du charbon positif pour la plonger dans la cuve cylindrique du calorimètre, placée sous le four. Tiré de H. Moissan, J. Violle, « Sur un four électrique », *CRAS*, 1893, Tome 115, p. 550.

Les termes utilisés par Violle peuvent laisser penser que le carbone subirait une fusion avant de bouillir et de passer à l'état de vapeur. Le *diagramme de phases* du carbone montre clairement que le passage de l'état solide à l'état liquide ne peut s'effectuer qu'à des pressions élevées (supérieures à 100 atmosphères). Dans la note de 1892, Violle dit bien du résultat qu'il a obtenu : « Telle est la température de la partie la plus chaude du charbon positif ainsi que de l'arc, ou la température de volatilisation du carbone. »⁹²

91. J. Violle, « Four électrique - Lumière et chaleur de l'arc », *Journal de physique théorique et appliquée*, 1893, sér. 3, tome 2, p. 545-552.

92. J. Violle, [Vio92], p. 1274.

Il semble bien expliquer par là qu'il s'agit pour le graphite d'un passage de l'état solide à l'état de vapeur ou gazeux, transformation plutôt désignée en langage moderne par *sublimation* et qui s'effectue, selon les déterminations récentes, à la température de 3652°C. La proximité du résultat de Violle sur cette constante physique du carbone permet d'estimer la valeur de sa méthode calorimétrique.

Les recherches sur l'arc électrique mobilisent déjà en France les meilleurs spécialistes des hautes températures comme le physicien Violle, mais aussi de nombreux chimistes dont Henri Moissan (1852-1907), Marcellin Berthelot (1827-1907), Henry Le Chatelier, Paul Vieille (1854-1934). Ils bénéficient de moyens importants, ceux des laboratoires de l'École normale supérieure et du Conservatoire des Arts et métiers où Moissan et Violle peuvent bénéficier d'une force de 50 chevaux pour obtenir des arcs allant jusqu'à 70 volts et 450 ampères, avec l'aide de Gustave Tresca, ingénieur-adjoint du Conservatoire. À côté des établissements de l'État, ils peuvent aussi profiter des installations du Laboratoire central d'électricité de la Société internationale des électriciens, qui vient d'être reconnue d'utilité publique (décret du 7 décembre 1886).

Les résultats de ces travaux vont être présentés le 1^{er} mars 1893, lors de la Réunion ordinaire mensuelle de la Société internationale des électriciens. À quelques mois du prochain congrès de Chicago, l'« *American Institute of Electrical Engineers* » a demandé aux sociétés savantes des différentes nations d'apporter les modifications qu'elles souhaitent et leurs contributions au programme provisoire de ce rassemblement mondial de la profession. En 1893, Blondel est seulement âgé de trente deux ans mais il est expérimenté et connaît parfaitement le dossier. Quand Édouard Hospitalier (1852-1907) lui cède la parole, le jeune ingénieur sait dénoncer l'argot industriel de « voltage », les qualificatifs abusifs dont on affuble une simple différence de potentiel dans « force électromotrice imprimée » ou « force électromotrice effective », toutes habitudes d'un langage technique encore mal assuré. Pour ce qui concerne la photométrie, il propose de donner à l'unité d'éclairement son nom actuel, « lux » à la place de « carcel à un mètre » ou « bougie à un mètre » avec deux définitions possibles : 1 lux = 1 violle à 1 mètre ou 1 lux = 1 bd à 1 mètre (bd pour bougie décimale). Et il insiste, non sans humour, sur le motif commercial qui a présidé au choix de la bougie décimale pour unité pratique d'intensité selon : 1 bd = $\frac{1}{20}$ violle, « le principal », comme on le sait, c'est qu'il est plus agréable à la fois pour le vendeur et pour l'acheteur de donner à une lampe le nom de « lampe de 100 bougies » que celui de « lampe de 5 violles ». »⁹³

Enfin, lorsque l'orateur aborde le sujet portant « Sur un étalon secon-

93. A. Blondel, « Sur le programme provisoire proposé pour le Congrès international des

daire pour la Photométrie des lampes à arc », c'est d'abord pour inventorier toutes les causes d'erreurs habituellement commises lors de l'évaluation de ces sources lumineuses et dénoncer les « méthodes de la Photométrie hétérochrome, dont l'apparence savante dissimule la fragilité et quelquefois même l'inexactitude des points de départ. Dans tous les cas, il y a complication de moyens et doute sur le résultat. »⁹⁴ Blondel donne les raisons d'ordre physiologique qui empêchent la photométrie hétérochrome de fournir des résultats fiables, raisons dont les effets ont été parfaitement quantifiés par Macé de Lépinay et Nicati. La première réside dans l'effet Purkyně : quand l'intensité objective d'une lumière augmente, la sensation augmente d'autant plus lentement que la lumière est plus réfrangible. Le second phénomène est révélé par la différence entre les « coefficients d'égalité de clarté » et les « coefficients d'égalité d'acuité », écart qui augmente rapidement avec la réfrangibilité de la lumière. Les évaluations d'une lumière par les deux méthodes, égale clarté et égale acuité, fournissent des résultats différents (supra 4.7).

Au Congrès des électriciens de Chicago, le jeune ingénieur français livre une analyse fine des erreurs systématiques, causées par des phénomènes physiologiques incontournables et il en déduit les règles que doivent observer les photomètres dans leur expertise des lampes à arc :

*1st. We compare the arc lamp with the standard, by the aid of a Foucault or Bunsen photometer, while winking the eyes, as described by M. Allard, until the sensation of color disappears. One obtain thus a value, characteristic of the luminous intensity, under conditions always identical.*⁹⁵

Ce premier essai fournit ainsi une valeur par la méthode d'égalité des *clartés* ou « *equality of brightness* », valeur qui est malheureusement désigné dans ce rapport par l'expression « *luminous intensity* », pour le moins imprécise.

*2nd. We compare then the two sources by reading with them, aided by photometers based on the visual acuteness, taking care to give in all the trials the same value to the absolute illumination and to expressly indicate it; the most convenient is that which barely allows the reading the characters of ordinary print. One obtains thus a value of the visual intensity.*⁹⁶

électriciens de Chicago, en 1893. Discussion sur la communication de M. Hospitalier. », *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, 1893, tome 10, p. 128.

94. A. Blondel, *ibid.*, p. 133.

95. A. Blondel, *op. cit.* [Blo93b], p. 321.

96. A. Blondel, *op.cit.* [Blo93b], p. 321.

Cette seconde valeur correspond à l'essai d'acuité égale et se trouve, elle aussi, désignée par l'expression non moins ambiguë : « *visual intensity* ». Ces conditions posées, aussi précises soient-elles, révèlent encore l'empirisme qui sert de guide à la photométrie hétérochrome et qui se traduit ici par une utilisation particulière du système visuel de l'observateur, comme le clignement des yeux, préconisé par Émile Allard (1818-1892). Pour obvier à ces méthodes artisanales, Blondel propose un nouvel étalon secondaire qui, par sa nature et par sa teinte, est le plus adapté à l'évaluation de la lumière électrique. Il baptise l'instrument : « arc-étalon ».

*Nevertheless it appears to be much preferable to eliminate the causes of the difficulties noticed , by replacing for the study of arc lamps the standards commonly employed, by a secondary standard having also an arc for its origin, and having a nearly identical tint. It suffices then to know once for all, the properties of that standard to form an exact idea of the value of all lamps measured by it . This standard is obtained , as has been stated above, by isolating a small portion of the positive crater of a carbon sufficiently pure.*⁹⁷

Cette installation représentée figure 5.9 comprend une lampe sortie des ateliers Sautter et Harlé dont les crayons sont inclinés de 20° par rapport à la verticale, disposition dont Blondel donne la raison en ces termes :

(...) grâce à cette obliquité , le cratère positif, situé sur le charbon supérieur, présente une surface inclinée également de 50° à 60°, par rapport à la verticale, et qu'il est facile de dégager complètement du crayon inférieur en donnant à l'arc un écart de 4mm à 5mm.⁹⁸

À petite distance de l'arc est placé un écran *A* qui est une boîte plate, refroidie par un courant d'eau froide (amené par les tuyaux *T*). La boîte est percée d'un orifice derrière lequel un jeu de diaphragmes d'ouvertures connues (Blondel préconise une surface d'ouverture de 1 *mmq*⁹⁹) permet de régler la quantité de lumière reçue par le photomètre. Un premier réglage consiste à former, à l'aide d'une lentille, sur un écran *E* une image agrandie et inversée des crayons de carbone. On peut ainsi ajuster très précisément la position du *cratère* de sorte que sa lumière pénètre totalement dans le photomètre par l'ouverture *f*. On

97. A. Blondel, op.cit. [Blo93b], p. 322-323.

98. A. Blondel, op. cit. [Blo93d], p. 135.

99. Le symbole de l'unité « *mmq* » utilisé ici est celui que l'on réserve à l'époque à une *section* de conducteur. On doit donc comprendre qu'il s'agit d'une surface de 1 mm².

peut utiliser indifféremment un photomètre de Foucault, de Bunsen ou d'un autre type. Il s'agit certainement sur la figure 5.9 d'une disposition de type *Bunsen* : la lumière (non représentée) objet de la mesure est placée à gauche, sur le banc photométrique et pénètre dans l'appareil par l'orifice symétrique de f pour illuminer l'écran à tache translucide P . Blondel rédige la méthode

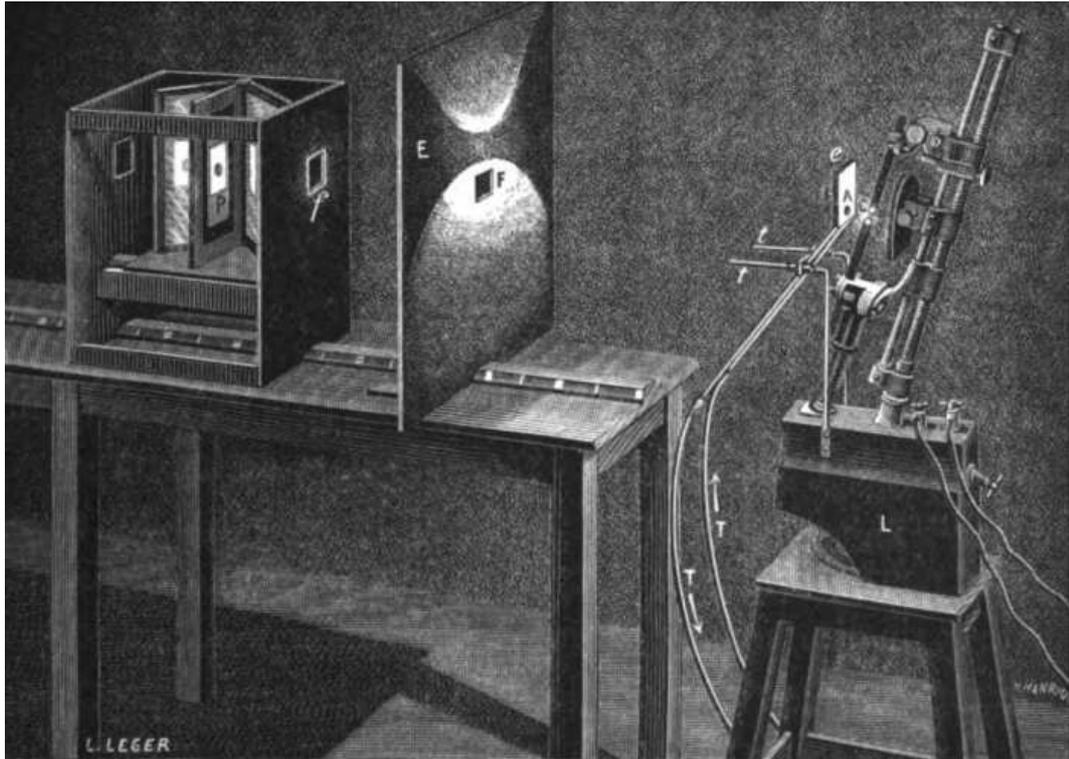


fig. 5.9 – L'arc-étalon conçu par Blondel. La lampe des ateliers Sauter est placée à droite : remarquer ses crayons inclinés. La comparaison est faite par un photomètre de Bunsen : distinguer dans le boîtier l'écran et son disque translucide (en gris) et, de part et d'autre, les deux miroirs inclinés qui permettent d'observer latéralement le contraste sur chacune des faces de l'écran. Tiré de A. Blondel, « Sur un étalon secondaire pour la Photométrie des lampes à arc », *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, 1893, Tome 10, p. 135.

d'utilisation de son arc-étalon avec la même précision que Dumas et Regnault ont apportée à la définition de l'étalon Carcel, dédié au pouvoir éclairant du gaz d'éclairage. Sont en particulier indiquées les conditions d'alimentation les plus favorables : tension (aux bornes du dipôle lampe + rhéostat), 75 volts ; densité de courant d'au moins 0,2 ampère par millimètre carré. Des crayons de 15 mm traversés par un courant de 40 ampères, mais aussi des crayons de 10 mm pour 25 ampères donnent de bons résultats.

Blondel va fournir au Congrès de Chicago un compte-rendu exhaustif de

toutes les expériences et vérifications réalisées au Laboratoire central d'électricité : constance de l'éclat à courant constant pour le même type de charbon ; constance de l'éclat pour les mêmes charbons et pour des conditions variables de courant ; influence de la qualité des crayons en carbone *dur*, en carbone *doux*, à mèche (« *wick* »). Dans ce dernier type de crayon, on ménage le long de l'axe central un canal que l'on remplit d'un mélange de charbon et de divers minéraux agglomérés, ce qui constitue « la mèche ». Cette disposition contribue à stabiliser l'arc et permet d'augmenter la densité de courant. D'après J. Parisot, chef du Laboratoire Central de Recherches de la société

Carbons Used in the Left-hand Arc.	Distance from the Photometer Screen.		
	To the Right-hand Arc Standard.	To the Left-hand Arc Standard.	
	Readings.	Average.	
<i>L</i> homogeneous hard ...	271.6	} 279.6	} 267.8
	278.1		
	283.9		
	276.4		
<i>C</i> wick.....	263.6	} 264.2	} 283.2
	262.6		
	267.0		
	266.2		
<i>L</i> ₁ wick, high voltage...	275.4	} 276.1	} 271.1
	274.9		
	278.0		
<i>L</i> wick, low voltage....	265.0	} 263.6	} 283.8
	262.5		
	258.6		
	260.4		
	267.4		
	267.2		
	263.9		

fig. 5.10 – Résultats des essais effectués pour les crayons de deux constructeurs différents, désignés par "C" et "L". Les distances sont évaluées en mm. Tiré de A. Blondel, [Blo93b], p. 331.

*Carbone Lorraine*¹⁰⁰, « un charbon de 12 mm ainsi méché peut supporter une intensité de 35 A contre 10 seulement pour un charbon homogène de même

100. La société « Carbone Lorraine » a succédé à la Société « le Carbone » qui a fourni une partie des crayons utilisés par Blondel pour ses expertises.

diamètre. »¹⁰¹ Pour ces essais, Blondel a utilisé deux arcs « *standard* » identiques. Les crayons ont été fournis par trois fabricants désignés par les lettres *B*, *C* et *L*. Du côté droit du photomètre est posé l'arc servant d'étalon qui travaillera sous le même « *voltage* » moyen, avec les mêmes crayons méchés de chez *L*. À gauche du photomètre est placé l'arc *en essai* pour lequel seront testés des charbons de fabrications différentes. Les deux arcs sont placés aux extrémités du banc dont la longueur est 547,4 mm. L'égalisation photométrique est obtenue en déplaçant le photomètre placé sur le banc entre les deux lampes. Les essais se ramènent à cette conclusion :

*It will be seen that one ought to use wick carbons only with precaution. There are among them, however, some which give the best results for the arc-standard from the point of view of fixity. They should be selected by comparison with others of the same quality; the best are the soft carbons, or middling hard ones with a high voltage wick. The difference of brightness between a carbon and its wick ought not to be sensible to the naked eye on the photometer. It is of course implied that such a standard must be calibrated by comparison, and that one cannot a priori indicate its brightness.*¹⁰²

En clair, les meilleurs résultats du point de vue de la fixité, qualité essentielle pour un étalon, sont obtenus avec les charbons doux ou moyennement durs et avec mèche, sous une tension élevée. Il semble que la différence d'éclat entre le charbon et sa mèche ne puisse être discernée à l'œil nu. Blondel insiste bien sur le fait que toute modification du standard demande une nouvelle calibration : « on ne peut indiquer a priori sa brillance ». Blondel va donc effectuer l'étalonnage de l'arc-étalon pour déterminer sa « brillance absolue ». Or, il ne fera pas cet étalonnage par rapport à l'étalon primaire déterminé par Violle, choix surprenant alors qu'il connaît Violle et a toujours défendu son étalon au platine¹⁰³. Blondel va ainsi effectuer une série de 50 mesures de la brillance par rapport à un *étalon Carcel* qui lui permet d'annoncer une valeur moyenne de « *158 candles* ». En vue de la préparation du congrès de Chicago, Blondel peut proposer à la Société des Électriciens de faire part des résultats de ses travaux sur l'arc électrique à l'« *American Institute of*

101. J. Parisot, « Arc électrique et projection cinématographique », *Atti e rassegna tecnica della Società degli ingegneri e degli architetti in Torino - nuova serie - Anno 6, 1952, n°12*, p. 400-401.

102. A. Blondel, [Blo93b], p. 332.

103. On peut avancer l'hypothèse que Violle ne pouvait plus disposer du platine qui lui avait été prêté par Johnson et Matthey.

Electrical Engineers » de New York et des propositions suivantes qui seront intégralement traduites dans les actes du congrès :

Il y aurait lieu, dans le but de faciliter les mesures photométriques de lampes à arc, en leur donnant une base plus comparable que les flammes ordinaires, d'adopter, dans ce cas spécial seulement, un étalon secondaire particulier, dit arc-étalon, défini comme l'intensité lumineuse d'une surface donnée de carbone pur portée à la température de volatilisation, et réalisé de la manière indiquée plus haut.

La valeur moyenne de cet étalon secondaire en fonction de l'étalon Violle serait établie une fois pour toutes dans des conditions bien définies, c'est-à-dire pour une série de valeurs absolues, connues, de l'éclairement.

Quant aux mesures, elles seraient toujours exprimées en bougies décimales, en ajoutant la mention : *d'après l'arc étalon*.¹⁰⁴

Les travaux de Violle et de Blondel vont être à l'origine d'une querelle de priorité au Congrès de Chicago où Silvanus Thompson s'empresse de présenter une note « *On the Swinburne-Thompson unit of light* ». Dans cette note, le Britannique demande, ni plus ni moins que de remplacer l'étalon Violle par l'unité à laquelle il attribue de façon prématurée son propre nom et celui de Sir James Swinburne (9th Baronet, FRS, 1858–1958). Cette nouvelle lumière n'est rien d'autre que celle émise par l'unité d'aire d'une portion du cratère positif de l'arc formé entre deux électrodes de carbone pur, lumière dont la constance aurait été signalée, dans une communication datant de quelques années par Abney. Thompson déclare :

*The advantages over the platinum or Violle unit are also considerable. The carbon arc is much more easily managed, and if a pure carbon is employed, it is much reliable as a standard than the mass of molten platinum. (...) It was in consequence of the recognition of these physical properties of the true crater surface, that the writer and Mr. Swinburne, each made the proposition for the establishment of a new unit to supersede the Violle standard.*¹⁰⁵

Malheureusement, Thompson n'apporte aucune donnée expérimentale à l'appui de sa proposition, et Blondel qui évoque deux interventions faites respectivement par Swinburne et Thompson, au sujet de l'arc, devant l'*Institution*

104. A. Blondel, [Blo93d], p. 139.

105. S. P. Thompson, « *On the Swinburne-Thompson unit of light* », *Proceedings of the International Electrical Congress held in Chicago, 1893.*, p. 267-269.

of *Electrical Engineers* de Londres ne manque pas de souligner : « *But no effect being given by the authors themselves to these proposals, they were condemned afterward by Mr. Trotter [Alexander Pelham Trotter, 1857-1947] in default of experimental proofs.* »¹⁰⁶

La réponse de Blondel ne va pas se faire attendre dans les colonnes de la *Lumière électrique*. « Il ne suffit pas en effet, comme le croît M. S.-P Thompson, d'établir que la température est constante ; il faut encore réaliser un pouvoir émissif constant. J'espère faire connaître ultérieurement une solution satisfaisante à ce sujet ; »¹⁰⁷ Le physicien français, avec l'aide de Le Chatelier s'est livré à une étude de la brillance du cratère en utilisant un *pyrophotomètre* dont la sensibilité malheureusement insuffisante n'a pas permis de mettre en évidence l'influence de la qualité des charbons sur la brillance. Il signale également la difficulté d'évaluer la brillance du cratère par une méthode photographique, méthode déjà envisagée par Violle, en raison du pouvoir *actinique* de l'arc, supérieur à celui du cratère lui-même. À l'issue de toutes ces recherches, Blondel a effectivement constaté les légères fluctuations de la brillance émise par le cratère de l'arc, fluctuations qui sont dues aux phénomènes complexes à l'intérieur de la vapeur carbonée entre les deux électrodes. Selon lui, ces variations de l'émission empêchent l'utilisation de l'arc comme étalon primaire et il le signale dans son rapport lu à Chicago

*In consequence of the variations still presented by the different carbons, and which will, perhaps, be eliminated later on by the use of chemically pure carbons, the arc cannot be actually employed as an independent standard; besides it would not be desirable on any account, for the Violle standard, chosen definitively, suffices for that task.*¹⁰⁸

Aussi Blondel ne peut-il davantage cacher son irritation devant l'initiative de Thompson et la volonté du Britannique de vouloir remplacer à toutes forces l'étalon Violle, sans qu'il soit en mesure de produire la moindre donnée sur la brillance du cratère de l'arc et sur sa constance, qu'il faudrait au moins pouvoir comparer à celle de l'étalon Violle.

Mon rôle plus modeste a été de faire entrer cette question dans la voie de la pratique, où personne ne l'avait transportée jusque-là,

106. A. Blondel, [Blo93b], p. 315-316.

107. A. Blondel, « Au sujet de l'unité de lumière », *La Lumière électrique*, 1893, tome 50, n°44, p. 222-223.

108. A. Blondel, [Blo93b], p. 333.

et de donner une première détermination (provisoire) de l'intensité lumineuse émise par un millimètre carré de cratère. Le chiffre que cite M. S.-P Thompson est d'environ 100 0/0 trop faible, ce qui constitue pour la prétendue unité Swinburne-Thompson, une fâcheuse entrée dans le monde, et tend à prouver que M. S.-P Thompson n'a pas même cherché à la déterminer expérimentalement ;¹⁰⁹

Comme l'affirme Blondel avec justesse, la réponse à la question de l'unité de lumière ne peut être apportée en substituant à l'étalon Violle un nouvel étalon, en raison de la diversité des lumières à *photométrer* dans la pratique, sources que l'on peut cependant séparer en deux catégories, en fonction de ce que la photométrie actuelle appelle la « température de couleur » : 1° Les sources jaunes comme la lumière du gaz, les lampes à flamme, à incandescence comprenant ici les manchons à gaz (type Auer) et à incandescence électrique ; 2° les sources blanches comme l'arc électrique. Compte tenu des différences marquées entre ces deux groupes, Blondel propose « l'emploi de deux étalons, l'un jaunâtre (étalon Violle), l'autre blanchâtre (arc-étalon). Ces deux étalons devront être comparés une fois pour toutes d'après des bases scientifiques précises, de façon à établir entre eux une certaine relation d'équivalence toute physiologique. »¹¹⁰ Mais comment cette « relation d'équivalence toute physiologique » peut-elle être déterminée ? Si Blondel ne le précise pas dans son article, il a compris tout l'enjeu de cette entrée de la physiologie dans la métrologie : la définition de l'unité lumineuse ne peut reposer que sur des données physiologiques.

5.5 Le paradoxe du projecteur ou la loi de l'inverse du carré de la distance en défaut

La publication des commentaires de Blondel « au sujet de l'unité de lumière » dans *La lumière électrique* est révélatrice du rôle de la presse spécialisée sur l'électricité dans la construction et la diffusion des savoirs concernant la photométrie. Cette implication prend toute sa mesure dans les deux dernières décennies du siècle et accompagne l'édification de la discipline, à côté de la relation des prouesses technologiques promises par les développements de la science *électrique*. La consultation de ces revues montre qu'elles s'adressent à un public averti, possesseur d'une culture scientifique et technique de très bon niveau. La bibliographie que leur a consacrée Christine

109. A. Blondel, « Au sujet de l'unité de lumière », *La Lumière électrique*, 1893, tome 50, n°44, p. 223.

110. A. Blondel, *ibid.*, p. 223.

Chappuis s'appuie sur le fonds du Cnam qui en possède les collections complètes. Ce qui suggère qu'elles s'adressent à un public d'ingénieurs ou de professeurs. La création de ces périodiques souvent mensuels ou bimensuels à l'initiative d'ingénieurs ou de membres de sociétés savantes répondent à des motifs identifiés très justement par Christine Chappuis :

Les articles expriment avant tout les positions de leurs auteurs et leurs représentations de ce qui est intéressant, de ce qui est prometteur ou de ce qui ne l'est pas... Ceux qui écrivent, que ce soit pour exposer leurs propres réalisations et travaux ou ceux d'autres personnes, traduisent dans leurs articles des engagements au sens noble du terme : ils s'engagent sur certaines pistes techniques et industrielles dont l'histoire n'a pas encore établi si elles seraient justes ou fausses, gagnantes ou perdantes. En promouvant une revue, certains milieux se construisent et affirment l'intérêt de leur domaine spécifique... ¹¹¹

L'« engagement » des responsables éditoriaux des revues publiant sur l'électricité peut s'apprécier sur le cas d'Édouard Hospitalier ¹¹², rédacteur en chef de la revue *L'industrie électrique* ou *Revue de la science électrique*, fondée en 1891, et professeur à l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris. Ingénieur centralien, Hospitalier est membre, comme André Blondel, de la Société internationale des électriciens et il connaît bien le jeune ingénieur, de neuf ans son cadet. Tous deux ont par exemple coopté Georges Claude (1870-1960) pour son admission dans cette compagnie. Les comptes rendus des séances de la Société des électriciens, ceux de la Société française de physique et d'autres sociétés savantes françaises ou étrangères sont aussi commentés dans la revue qui offre aussi une rubrique *jurisprudence* où sont par exemple exposés les termes des traités conclus entre les municipalités et les compagnies de distribution du gaz et de l'électricité. Des litiges se font jour lorsque telle ou telle commune veut dénoncer un contrat avec une société gazière pour pouvoir se tourner vers l'éclairage électrique. Pour assurer la publication de sa revue, Hospitalier s'entoure d'un cercle restreint de « collaborateurs », jeunes ingénieurs de haut niveau parmi lesquels André Blondel déjà cité et Charles-Édouard Guillaume (1861-1938), diplômé de l'École polytechnique fédérale de Zürich et membre du Bureau international des poids et mesures. Ces derniers pourront ainsi bénéficier d'un espace de

111. C. Chappuis, « L'électricité dans les périodiques. », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, juin 1983, n°1, p. 66-69

112. Lire la notice nécrologique que J. Laffargue a consacrée à Édouard Hospitalier dans *La Nature*, 1907, n° 1764, p. 256.

publication vaste et pérenne (la revue cessera de paraître en 1936). Ainsi les travaux de Blondel sur l'arc électrique alternatif, sur le couplage des alternateurs ou la description d'un *oscillographe* pour décrire les ondes électriques de faibles fréquences se voient-ils offrir une place généreuse dans les pages de *L'industrie électrique*.

L'expertise de Blondel est également très appréciée dans le domaine de l'optique de la photométrie et de l'éclairagisme. Les compétences de l'ingénieur du Service des phares et balises vont ainsi offrir à Hospitalier l'opportunité de lancer dans son journal un débat qu'il qualifie de « Fantaisies photométriques »¹¹³. Le prétexte en est l'estimation des performances des projecteurs Schuckert (du nom du fondateur de la société, Johann Sigmund Schuckert, 1846-1895) présentés à l'Exposition universelle de Chicago. Le fabricant annonce, dans la direction où elle est maximale, une intensité lumineuse entre 190 000 000 et 240 000 000 bougies, chiffres qui apparaissent extravagants au professeur Thompson qui s'en explique dans la revue britannique, *The Electrician*. En se fondant sur la valeur admise d'une intensité d'environ 150 bougies émise par un mm² de cratère de l'arc, Thompson affirme tout simplement qu'il faudrait au moins un cratère d'une surface de un pied carré pour prétendre à une intensité de 1 000 000 bougies. Les projecteurs de la Maison Schuckert devraient ainsi posséder une section comprise entre 190 et 240 pieds carrés (soit entre 17,6 et 22,3 m²) ! En réponse à la question de l'évaluation du projecteur, le rédacteur en chef de *The Electrician* déclare qu'on ne peut comparer l'intensité d'une source ponctuelle dont les rayons divergents provoquent un éclairage proportionnel au carré de la distance, avec la *quantité de lumière* contenu dans le faisceau parallèle émis par un projecteur, produisant un éclairage constant, à quelque distance que soit la source. Hospitalier récapitule l'affaire :

La discussion que nous venons de résumer prouve jusqu'à l'évidence que la photométrie pêche par la base, et qu'il est absolument impossible de comparer et d'exprimer en fonction d'une seule et même unité l'intensité lumineuse d'un foyer lumineux réduit théoriquement à un point mathématique, et celle d'un faisceau lumineux dont les rayons sont parallèles ou sensiblement tels. En effet, avec le premier, l'éclairage diminue en raison directe du carré de la distance ; dans le cas de rayons parallèles, l'éclairage reste constant, en négligeant l'absorption de l'atmosphère. Plus on s'éloigne du foyer, dont les rayons ont été rendus paral-

113. É. Hospitalier, « Fantaisies photométriques - Sur l'intensité lumineuse des projecteurs et des phares », *L'industrie électrique*, 1893, vol. 2, n° 45, p. 499-500.

lèles, plus l'intensité lumineuse, calculée à la manière ordinaire, augmente; elle augmente même au delà de toute limite, ce qui est physiquement impossible.¹¹⁴

Hospitalier conclut son article d'une façon lapidaire : « les valeurs des intensités lumineuses attribuées aux phares et aux projecteurs n'ont aucune signification physique. » et « Sur ce point comme sur bien d'autres, la photométrie est entièrement à refaire. »¹¹⁵, opinions qui suscitent une réponse de Blondel qui vient d'être nommé professeur d'électricité appliquée à l'École des ponts et chaussées. Hospitalier qui n'attendait que cela, offre un espace de publication à l'expertise de Blondel. « Nous attendrons que l'étude de M. Blondel, dont nous publions aujourd'hui la première partie, soit complète, pour conserver ou changer le scepticisme que nous inspirent les questions photométriques en général et la photométrie des projecteurs en particulier. »¹¹⁶ Le jeune ingénieur du Service des phares et balises, placé sous le patronage de l'Inspecteur général Bourdelles (Jean-Baptiste (dit Léon) Bourdelles, 1838-1899) est particulièrement à l'aise sur ces questions. Il va livrer en quelques pages, aux lecteurs de *L'industrie électrique*, une étude complète de la « Théorie photométrique des projecteurs ».

Il est évident pour Blondel que la notion de source ponctuelle et la loi des distances telles qu'elles ont été utilisées en photométrie presque exclusivement depuis Bouguer ne constituent pas les bases suffisantes d'une science confrontée à des questions technologiques de plus en plus ardues. Il ne s'agit plus désormais d'empirisme et de comparaison, il faut bien le dire à l'estime, du pouvoir éclairant de tel ou tel bec de gaz avec l'étalon Carcel. Le travail de conception d'un projecteur demande des calculs difficiles, la prévision de ses performances des nombres sortis de théories solidement établies. Mais pour un luminaire, quelle grandeur faut-il exprimer : une puissance, une quantité de lumière, l'intensité, l'éclat, l'éclairement... ? Tout ceci doit être convenablement précisé. Il est indispensable d'élargir ce champ disciplinaire avec un système cohérent de nouvelles grandeurs, ce que Blondel exprime sans fard : « le langage photométrique est, je crois, criticable (sic) et le nombre d'unités insuffisant. », opinion qu'il n'hésite pas à qualifier lui-même de « subversive »¹¹⁷. Hospitalier va donc offrir à Blondel l'opportunité d'exposer sa théorie des projecteurs et de publier quelques conventions et règles qu'il destine à la photométrie, en commençant par ces définitions : «

114. É. Hospitalier, *ibid.*, 500.

115. É. Hospitalier, *ibid.*, 500.

116. É. Hospitalier, *ibid.*, 513.

117. A. Blondel, « Grandeurs et unités photométriques », *La lumière électrique*, 1894, tome 53, n° 27, p. 7-15.

- q , quantité de lumière (énergie lumineuse divisée par le temps).
- s , surface éclairée.
- e , intensité d'éclairement en un point,

$$e = \frac{dq}{ds}$$

- i , éclat en un point sous un angle d'émission donné ϵ :

$$i = \frac{dq}{ds \cdot \cos(\epsilon)}$$

- I , intensité lumineuse dans une direction donnée.
- I_g ou P , intensité lumineuse à grande distance (ou puissance lumineuse) d'un appareil dans une direction donnée.
- r ou l , longueurs ou distances.

»¹¹⁸

On peut supposer que l'ordre selon lequel Blondel classe chacune de ces grandeurs n'est pas arbitraire. À la première place, figure la *quantité de lumière* que Blondel définit comme une énergie divisée par un temps. Un faisceau de lumière transporte de l'énergie et la grandeur responsable de ses effets observés est l'énergie émise ou reçue par unité de temps, c'est à dire la puissance. Par analogie avec les phénomènes magnétiques, Blondel l'appellera plus tard « flux lumineux ». Ce sera, à ses yeux, la grandeur fondamentale de la photométrie. Les quantités suivantes apparaissent comme des grandeurs *dérivées* de la quantité de lumière. Ainsi de l'« intensité d'éclairement en un point »¹¹⁹ qui représente la quantité de lumière reçue par unité de surface dans le voisinage de ce point¹²⁰. Les grandeurs suivantes, éclat et intensité, décrivent la façon dont la lumière est issue des différents points de la source et se répartit dans les différentes directions de l'espace¹²¹. Selon Blondel, une partie des erreurs commises en photométrie réside dans l'utilisation abusive du modèle de *source ponctuelle* :

Quand l'on n'étudie que la marche générale des rayons, on peut se contenter, comme on l'a fait souvent, d'assimiler la source de

118. A. Blondel, « Théorie photométrique des projecteurs », *L'industrie électrique*, 1893, vol. 2, n° 46, p. 517.

119. Désignée plus simplement aujourd'hui par « éclairage ».

120. ds étant un petit élément de surface autour du point recevant la quantité de lumière dq .

121. ds étant alors le petit élément de surface d'émission de la quantité de lumière dq autour du point.

lumière à un point géométrique, ce qui simplifie beaucoup les raisonnements.

Quand au contraire on se préoccupe de l'effet photométrique, on commet les plus graves erreurs en conservant cette conception théorique.

L'idée de « source ponctuelle » est en effet une idéalisation mathématique. On peut cependant toujours définir la distribution de son *intensité* dans l'espace par ce que Charles Fabry¹²² appelle la « densité du flux en direction », ce qui traduit l'intensité de la source dans une direction donnée par la formule :

$$I = \frac{dq}{d\Omega}$$

où dq est la quantité de lumière émise dans un cône infiniment étroit d'angle solide $d\Omega$ autour de cette direction. Mais une source réelle possède toujours une étendue et se présente sous forme d'une surface lumineuse dont l'*éclat* n'est, en général, pas uniforme. La simple observation d'une flamme montre que son émission n'est pas égale d'un point à un autre et qu'elle diffère aussi selon l'angle d'émission¹²³. Et Blondel cite l'exemple de la flamme d'une bougie placée au foyer d'une lentille. Au lieu d'obtenir un faisceau parallèle comme le prévoit l'hypothèse d'une source punctiforme, le faisceau issu de la lentille montre une importante divergence en raison de l'étendue de la flamme. Ainsi, même si la surface du cratère d'un arc électrique utilisé dans un projecteur se trouve réduite à quelques mm², le faisceau, à la sortie de l'appareil, présente une divergence de 1° à 2° et n'est donc pas cylindrique, mais conique.

Tous les points de la lentille jouant un rôle analogue, celle-ci devient une source secondaire de lumière, présentant un certain éclat intrinsèque comme toutes les sources de lumière, et à laquelle on peut appliquer par conséquent, d'une manière tout aussi légitime, la notion de l'intensité à grande distance, mesurée par l'éclairement.

Fort de son expérience d'ingénieur des phares et de ses observations, Blondel peut ainsi introduire une notion nouvelle l'« intensité lumineuse à grande distance » qu'il appelle aussi la « puissance lumineuse » de l'appareil sans oublier de préciser « dans une direction donnée » :

122. Charles Fabry, *Introduction générale à la photométrie*, 1927, p. 21.

123. On peut caractériser l'émission d'un petit élément de surface ds autour d'un point M par la quantité de lumière dq ramenée à l'aire lumineuse projetée dans un plan normal à la direction d'observation ϵ , ce qui définit « l'éclat intrinsèque localement au point M , selon la formule donnée par Blondel.

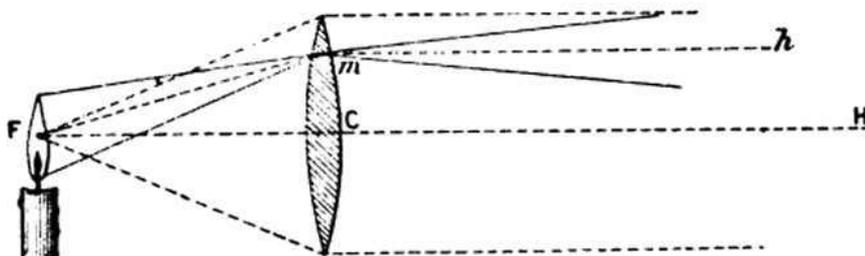


fig. 5.11 – « chaque point m de la lentille (...) recevant de la source un petit faisceau de rayons conique émettra autour de l'horizontale mh un petit faisceau également conique, dont l'angle minimum est pratiquement de l'ordre de grandeur de 1° . » Tiré de A. Blondel, « Théorie photométrique des projecteurs », *L'industrie électrique*, 1893, vol. 2, n° 46, p. 517.

Or c'est un fait d'expérience (...) qu'à partir d'une certaine distance, l'éclairement mesuré dans l'axe du faisceau par un observateur qui s'éloigne, varie en raison inverse du carré de la distance à la surface du projecteur. Rien ne saurait empêcher d'appliquer à cette source secondaire la définition applicable à toutes les sources de grandes dimensions et de dire avec tous les ingénieurs de phares : *L'intensité lumineuse à grande distance d'un appareil optique dans l'axe du faisceau est la quantité constante vers laquelle tend le produit de l'intensité d'éclairement par le carré de la distance : $I_g = r^2 \cdot e$ c'est-à-dire, par conséquent, l'intensité d'un feu nu qui produirait le même éclairement à la même distance.*

Une autre vérification expérimentale de ce fait est apportée par Féry (Charles Féry, 1865-1935) chef de travaux pratiques au laboratoire d'optique de l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris. L'expérience de Féry effectuée sur une lentille convergente d'un diamètre $D = 7$ cm et d'une focale $f = 78$ cm, recevant la lumière d'un diaphragme circulaire d'un diamètre $d = 1,4$ cm, éclairé par un bec Bengel, montre que l'éclairement sur l'axe reste constant de $x = 0$ (centre de la lentille) jusqu'à la distance $x = a = \frac{D}{d} \cdot f$. Entre ces deux positions, un point sur l'axe n'est éclairé que par les rayons centraux. Les points tels que $x \geq a$ sont éclairés, non seulement par les rayons centraux, mais aussi par les rayons *marginiaux* et la lentille paraît entièrement éclairée. Si E est l'éclat uniforme de la source, Féry montre que l'éclairement sur l'axe devient

$$e = E \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{1}{x^2}$$

. À partir de $x \geq a$, « l'éclairement variera en raison inverse du carré des dis-

tances (...). On ne pourra donc appliquer les lois ordinaires de la photométrie qu'aux distances supérieures à $a = \frac{D}{d} \cdot f$. »

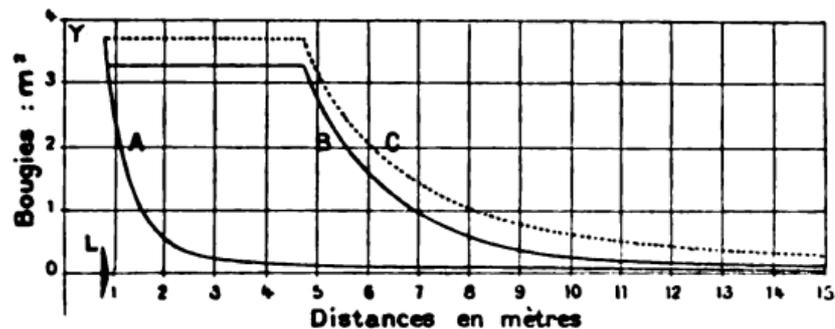


fig. 5.12 – Éclairage mesuré sur l'axe d'une lentille éclairée par la lumière d'un diaphragme de diamètre 1,4 cm. Courbe A, sans lentille. Courbes B et C, deux essais avec la même lentille. D'après Ch. Féry, *L'industrie électrique*, 1894, vol. 3, n° 52, p. 79.

L'étude de Blondel et les résultats de Féry résolvent ainsi le paradoxe du projecteur et l'analyse prosaïque qu'en a livrée Hospitalier. Ils montrent que la loi des distances ne peut s'appliquer pour les appareils optiques, et en particulier les projecteurs, qu'au-delà d'une certaine distance que Blondel évalue à 60 fois la distance focale pour les projecteurs de phares. « (...) pour les phares électriques et les projecteurs, il faut se placer au moins à 500 mètres pour avoir une mesure digne de confiance. » Blondel ajoute que les essais effectués au Dépôt des phares¹²⁴ respectent cette condition, le photomètre étant placé sur la première plate-forme de la tour Eiffel, situé à 600 mètres de là. Blondel peut maintenant énoncer cet important résultat :

Un miroir ou une optique aplanétique se comporte à grande distance exactement comme une surface (plane) incandescente ayant pour éclat intrinsèque en chaque point l'éclat même de la source au point correspondant, multiplié par les coefficients de transmission k et d'effet d'optique u .¹²⁵

Blondel fait intervenir deux coefficients de transmission et d'effet optique traduisant les pertes de lumière dans l'appareil et le fait qu'une partie des rayons n'est pas utilisée. On admet souvent une part de 70 à 80% de rayons utiles. Dans la pratique, explique Blondel, « Si l'on a affaire à une source

124. Dépôt malheureusement détruit récemment, en 1992, à cause de la méconnaissance du *Conseil économique et social* de l'intérêt historique de ce bâtiment.

125. A. Blondel, « Théorie photométrique des projecteurs », *L'industrie électrique*, 1893, vol. 2, n°47, p. 544.

dont l'éclat est bien défini, tel que l'arc à courant continu dont le cratère seul joue un rôle appréciable », on peut exprimer la puissance de l'appareil en fonction de l'éclat moyen i_{moy} en chaque point de la surface, par la formule « empirique » suivante :

$$P = \lambda \cdot S \cdot i_{moy}$$

« S étant la projection de la surface utilisée de l'appareil sur un plan perpendiculaire à l'axe optique , et λ un coefficient numérique qu'on peut appeler le coefficient d'utilisation. (...) Le coefficient λ , qui représente la réduction d'éclat due à l'effet optique et à l'absorption de l'appareil, sera déterminé par les calculs précédents ou obtenu empiriquement par des mesures photométriques, ainsi que la surface utile S. »¹²⁶ Blondel applique sa formule au calcul de la puissance d'un projecteur Schuckert dont le réflecteur parabolique, d'un diamètre de 1,560 m, possède une surface apparente de 1911000 mm², un coefficient λ que l'on peut estimer égal à 0,70 et pour lequel l'éclat intrinsèque du cratère positif de l'arc est 160 bougies par mm². Il trouve la puissance de l'appareil :

$$P = 0,70 \times 1911000 \times 160 = 215000000$$

soit 215000000 bd ce qui confirme la valeur annoncée par le constructeur allemand et qu'avait contestée Silvanus Thompson¹²⁷.

5.6 Grandeurs photométriques - Le système de Blondel

La théorie des projecteurs élaborée par Blondel dissipe les doutes entretenus par Hospitalier à l'encontre de la photométrie et montre que la résolution des problèmes photométriques demande l'utilisation parfaitement maîtrisée d'un formalisme élaboré. Cette étude et sa publication dans la revue d'Édouard Hospitalier offre à Blondel l'occasion de poser les bases de ce qu'il appellera la « photométrie géométrique ». Les principes de cette « petite science spéciale » seront exposés à l'occasion du Congrès de Carthage tenu par l'Association française pour l'avancement des sciences du 1^{er} au 4 avril 1896. Cette partie de l'optique, ainsi que la présente André Broca (1863-1925), dans son compte rendu du congrès, « permet d'étudier par le calcul dans certains cas définis les effets produits par une source de lumière, soit directement soit par l'intermédiaire d'appareils optiques agissant par réfraction

126. A. Blondel, *ibid.* p. 544-545.

127. Sur les performances des phares et des projecteurs, voir H. Bouasse, *Optique et photométrie dites géométriques*, Paris, Delagrave, 1937, p. 543.

ou par réflexion. »¹²⁸ Mais Blondel, ne va pas attendre le congrès de Carthage pour entreprendre la refondation des principes, établis par Bouguer, de la science consacrée à la *gradation* et à la mesure de la lumière. L'œuvre est importante et motive qu'un autre de ses biographes, Maurice Magnien (1920-2001), présente Blondel comme « un fondateur de la photométrie ». Le jeune *ingénieur des phares* va publier ses propositions pour cette refondation dans le numéro du 7 juillet 1894 de *La lumière électrique*. L'article copieux offre une définition moderne des grandeurs fondamentales de la photométrie et de leurs unités, telles qu'elles sont encore utilisées aujourd'hui. Selon Blondel, les insuffisances de la photométrie sont, en grande partie, celles de son vocabulaire qu'il place en parallèle avec celui de la *thermodynamique* :

Le langage classique attribue le nom de « quantité de lumière » au *flux* de lumière et se met ainsi en contradiction avec la terminologie adoptée dans l'étude de la chaleur, agent cependant analogue.

Il ne viendrait à personne aujourd'hui l'idée de confondre la quantité de chaleur Q avec le flux Φ , car la première est homogène au produit du second par un temps,

$$[Q = \Phi T]$$

Pourquoi donc établir cette confusion en photométrie où elle ne présente aucun avantage ? c'est tout ce qu'il y a de plus irrationnel, et il me paraît désirable au contraire d'employer désormais les notions de *flux* et de *quantité* de lumière exactement dans les mêmes conditions que le flux et la quantité de chaleur.¹²⁹

Le style de Blondel est direct, efficace, incisif, le propos sait aussi se montrer mordant quand il dénonce autant les abus que les insuffisances de langage d'auteurs et d'experts dont les jugements et résultats approximatifs n'ont fait qu'altérer la confiance dans la photométrie. Blondel dénombre « six quantités photométriques fondamentales : l'intensité, le flux, l'éclairement, l'éclat intrinsèque, l'illumination (« produit de l'éclairement e auquel est soumis un objet par la durée d'action de cet éclairement ») et la quantité de lumière (qui se rattache à l'énergie) »¹³⁰ Comment peut-on, s'agace Blondel, se contenter d'une « bougie » (voire d'une « candle power » pour les pays anglo-saxons)

128. André Broca, « Congrès de Carthage de l'Association française pour l'avancement des sciences », *La lumière électrique*, 1896, tome 8, n° 27, p. 8-9.

129. A. Blondel, [Blo94], p. 7.

130. A. Blondel, *ibid.*, p. 8.

servie à toutes les sauces, pour seule unité de grandeurs si différentes autant par le sens que par la *dimension physique*. Ce constat établi, Blondel propose son système d'unités, résumé, dit-il sur un ton plaisant, « dans le petit tableau suivant » :

Quantités physiques	Symbole et équation de définition	Dimensions	Noms des unités pratiques
Intensité lumineuse..	I	[I]	Pyr (ou bougie décimale) = 1/20 Vielle.
Flux lumineux	$\Phi = I \sigma$ ⁽¹⁾	[I]	Lumen.
Éclairement	$e = \frac{\Phi}{S}$	[IL ⁻²]	Lux.
Éclat intrinsèque ...	$i = \frac{I}{S}$	[IL ⁻²]	Pyr par centim. carré.
Rayonnement intrinsèque.....	$\varphi = \frac{\Phi}{S}$	[IL ⁻²]	Lumen par centim. carré.
Illumination.....	$j = et$	[IL ⁻² T]	Phot (ou lux-seconde).
Quantité de lumière..	$Q = et$	[IT]	Rad (ou lumen-seconde) Lumen-heure.

(¹) σ angle solide; dimension : un nombre.

fig. 5.13 – Tableau des grandeurs photométriques et de leurs unités proposé par Blondel. D'après A. Blondel, *ibid.*, p. 15.

Le premier fait remarquable est la présence en-tête du tableau de l'*intensité lumineuse* quand Blondel, dans sa théorie des projecteurs avait plutôt mis en avant la notion de *quantité de lumière*, définie comme une *puissance*. L'auteur s'en explique aussitôt : « Je prends l'intensité comme grandeur fondamentale conformément à l'usage, sans chercher à la ramener aux autres, parce que c'est une quantité physiologique plus que physique. »¹³¹

Il annonce ainsi, audacieusement que l'intensité est une quantité *physiologique* et qu'en conséquence, on ne peut l'exprimer en fonction des unités

131. A. Blondel, *ibid.*, p. 15.

fondamentales du système *C. G. S.* : elle correspond à une nouvelle dimension notée [I], irréductible aux dimensions de la physique puisqu'il s'agit ici d'une « intensité visuelle ». Il propose enfin le « pyr » pour nommer son unité, en lieu et place de la « bougie décimale » dont il se demande ce qu'elle peut bien avoir de « décimale »¹³². Blondel défend à tous crins son unité contre une *bougie* bien peu scientifique, mais qui n'a pas encore dit son dernier mot :

Il y aurait encore un avantage d'un autre ordre à adopter un nom nouveau, tel que « pyr », c'est qu'il donnerait désormais, comme il le faut, une estampille scientifique aux mesures de lumière, au lieu que le mot banal de « bougie » semble faire croire qu'il s'agit d'une unité empirique sans valeur. Actuellement tout homme sachant ce que c'est qu'une bougie de stéarine croit comprendre la photométrie, de même que tout homme sachant lire et écrire croit comprendre la philosophie ; lorsqu'on lui parlera de « pyr », il admettra plus aisément qu'il faille un certain apprentissage pour discuter les questions d'éclairage.¹³³

C'est dit et sorti de la bouche d'un esprit précis, rigoureux qui n'aime pas que l'on parle à tort et à travers de la lumière. L'ingénieur s'empresse d'ajouter qu'il ne faut pas pour autant renoncer au *violle* et il fait la différence entre « l'unité primitive théorique », complètement définie, réalisée par l'étalon au platine et le $pyr = \frac{1}{20}violle$, unité de base de son système d'*unités pratiques*. Maurice Magnien souligne cet élément : « Il est le premier qui se soit employé à dissocier la définition d'une unité (...) qui peut être théorique, de la réalisation de l'étalon primaire, qui peut être un dispositif de référence compliqué existant en très peu d'exemplaires »¹³⁴. Il reste à définir cette grandeur afin d'éviter les confusions avec les notions usuelles des photomètres telles que « quantité de lumière Q » dont l'expression est directement calquée sur la « quantité de chaleur » et évoque donc une grandeur *extensive*, ce que l'intensité lumineuse n'est pas. Cette « densité du flux en direction »

132. Pétri de culture classique, helléniste distingué, mais aussi certainement latiniste, Blondel fit le choix surprenant de la racine grecque *pyr* quand la *candela* (« bougie de suif » selon le Gaffiot) était à portée de main et si proche phonétiquement de la « *candle* » anglaise. Cela eût évité peut-être de longues discussions et le maintien de la *bougie décimale*, si mal acceptée en dehors de l'espace francophone. Mais le *pyr* paraissait-il plus universel aux yeux de Blondel et plus acceptable dans d'autres espaces linguistiques que celui des langues romanes ?

133. A. Blondel, *ibid.*, p. 10.

134. Maurice Magnien, « André Blondel 1863-1938. Un savant, un fondateur de la photométrie et de l'électrotechnique. », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, décembre 1988, n° 12, p. 167-188.

selon l'interprétation de Charles Fabry (supra) caractérise la lumière émise par la source dans chaque direction de l'espace. Or cette lumière ne peut être défini que par le *flux* lumineux Φ transporté par les rayons contenus dans une *petite* région de l'espace autour de cette direction. Cette région est limitée par un cône dont le sommet est le point lumineux de la source et l'étendue représentée par l'*angle solide* élémentaire que Blondel note σ . D'où l'intensité

$$I = \frac{\Phi}{\sigma}$$

tout en précisant que cette notion ne s'applique qu'à une source « ponctiforme ». Mais pour Blondel, la grandeur fondamentale devrait plutôt être le *flux lumineux* qui peut se rattacher plus facilement à la puissance, c'est à dire l'énergie transportée dans le faisceau par unité de temps (à l'aide d'un facteur physiologique, infra) .

De la définition de l'intensité sont déduites les autres grandeurs photométriques, à commencer par le *flux lumineux* : le produit $\Phi = I \cdot \sigma$ et pour lequel Blondel propose une nouvelle unité : le *lumen* qui est « le flux produit dans un angle solide égal à l'unité par une source ponctuelle d'intensité égale à un *pyr* ». ¹³⁵ Suit l'*éclairage* e en un point d'une surface, « égal au rapport du flux lumineux qui tombe sur un petit élément de surface à l'aire de cet élément.

$$e = \frac{d\Phi}{ds}. \quad (5.1)$$

L'unité conseillée par Blondel et déjà proposée par Preece au congrès de 1889 (infra) serait le *lux* défini comme « l'éclairage produit sur une surface de 1 m² par un flux uniforme de 1 lumen. Inversement on peut dire que un *lumen* est le flux lumineux capable d'amener un mètre carré à l'éclairage de 1 lux. » ¹³⁶ Ainsi se trouvent bannies toutes les unités prêtant à confusion telles que *bougie à un mètre*, *bougie décimale-mètre*, *foot-candle*, etc. Il faut également définir précisément l'*éclat intrinsèque* caractérisant l'émission d'une source étendue, notion dont le sens varie d'un utilisateur à l'autre : pour les uns, dans le cas d'une source d'intensité uniforme, cette notion se confond avec le quotient du flux Φ émis par la surface S de la portion rayonnante de la source. « Pour les autres, c'est le quotient de l'intensité lumineuse mesurée suivant la normale par la surface éclairante », deux conceptions différentes que les divers auteurs évaluent avec la même unité : la bougie par cm². Blondel préconise la définition la plus usuelle : l'éclat intrinsèque est le quotient de

135. A. Blondel, *ibid.*, p. 10.

136. A. Blondel, *ibid.*, p. 11.

l'intensité mesurée suivant la normale par la surface d'émission de la source

$$i = \frac{I}{S}. \quad (5.2)$$

L'unité pratique proposée est le *pyr par cm²*.¹³⁷

Deux ans plus tard, Blondel va soumettre un copieux rapport au Congrès des électriciens, réuni à Genève à l'occasion de l'Exposition nationale suisse du 4 au 9 août 1896¹³⁸. Dans son souci permanent de clarification et suivant une démarche très moderne, Blondel se place d'abord du point de vue du physicien et insiste sur les analogies formelles entre les grandeurs fondamentales de la photométrie et celles du *magnétisme* :

On supposera d'abord que les sources de lumière auxquelles on a affaire sont monochromatiques, de façon à pouvoir réduire l'étude de la lumière à des considérations purement physiques. Il suffit d'appliquer à la lumière des définitions analogues à celles qu'on emploie dans l'étude du Magnétisme. On fait intervenir ainsi trois grandeurs fondamentales, qui sont le *flux lumineux*, analogue au flux magnétique, *l'intensité d'une source ponctuelle*, analogue à l'intensité magnétique, et *l'intensité d'éclairement*, ou plus simplement *l'éclairement* qui joue le rôle de l'induction magnétique. Toutes les autres grandeurs s'en déduisent aisément.¹³⁹

Blondel part de la notion de « Source de lumière : Corps porté à l'incandescence et émettant des radiations en partie perceptibles pour l'œil. ». Si Blondel envisage la mesure de la lumière visible, appréciée par le récepteur oculaire, il prend la précaution d'accepter le mot *lumière* dans le sens plus large de *rayonnement*. Les définitions du formalisme qu'il va développer doivent donc s'entendre pour tout rayonnement visible ou invisible, phénomène de nature ondulatoire assurant le transport de l'énergie. Il insiste également sur cette notion première, le *flux* dont se déduisent les autres :

137. Sur cette question et la notion de *brillance* que Blondel proposera par analogie avec le terme anglais « *brightness* » et en remplacement de l'*éclat*, voir C. Fabry, [Fab27], p. 23-25.

138. Le rapport sera très rapidement et intégralement publié dans le numéro du 22 août 1896 de *L'éclairage électrique*.

139. A. Blondel, « Comptes-rendus des mémoires présentés au Congrès international des électriciens de Genève, Résumé du rapport de M. Blondel sur les unités photométriques », *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, 1896, tome 13, p. 355 et A. Blondel, « Rapport de M. Blondel sur les unités photométriques », *L'éclairage électrique*, 1896, tome 8, n° 34, p. 343. Blondel ajoutera cette précision : « *l'intensité d'une source ponctuelle*, analogue à l'intensité d'un pôle magnétique ; », A. Blondel, « Sur les unités photométriques », *Journal de physique théorique et appliquée*, 1897, 6(1), p. 187-193.

Il paraît bien préférable [plutôt que l'éclat] de prendre comme grandeur fondamentale le flux lumineux, qui est susceptible d'une définition physique où l'on fait intervenir l'énergie ondulatoire et qui se conserve le long d'un faisceau se propageant dans un milieu non absorbant. (...) D'ailleurs, il est nécessaire de pouvoir raisonner sur celui-ci indépendamment de la source qui le produit. La photométrie n'est complète que si elle permet d'évaluer le flux de lumière qui pénètre dans une fenêtre exposée au soleil, le flux contenu dans un faisceau projeté par un phare ou un projecteur. Jusqu'à une époque récente on n'avait pas eu l'idée d'exprimer ce flux par un chiffre ; cependant le flux est constant dans le faisceau depuis le moment où il tombe sur la lentille, et il constitue un des éléments caractéristiques de ces appareils.¹⁴⁰

Cela posé, Blondel expose les définitions de cette « photométrie physique » sur lequel va s'appuyer la « photométrie ». L'ossature physique de cette science se construit sur les notions suivantes :

Rayons lumineux : Lignes de propagation du flux lumineux , c'est-à-dire normales aux surfaces d'onde.

Faisceau lumineux : Ensemble de rayons lumineux limité par une ouverture.

Énergie du faisceau : Énergie physique des ondulations limitées au faisceau.

Flux : Énergie propagée par le faisceau pendant l'unité du temps.

Éclairage sur une surface placée en un point du faisceau : Rapport du flux reçu par la surface à l'aire de cette surface, autrement dit flux par unité de surface.

Intensité d'une source ponctiforme dans une direction donnée : Rapport du flux émis dans un cône infiniment petit à l'angle solide de ce cône ; autrement dit flux par unité d'angle solide, ou stéradian.

Éclat intrinsèque d'une surface lumineuse suivant une direction donnée : Rapport de l'intensité lumineuse d'un élément infiniment petit de cette surface, dans la direction considérée, à l'aire de la projection de cette surface, normalement au rayon ; autrement dit intensité lumineuse par unité de surface apparente.

Blondel peut maintenant achever le formalisme en définissant les grandeurs photométriques qui, elles, sont par nature des grandeurs *physiologiques*. Au sommet, Blondel place l'« énergie photométrique » désignée sous le nom de *quantité de lumière* :

Quantité de lumière : Grandeur physiologique représentant l'effet produit sur l'œil par l'énergie physique de la radiation, et égale à

140. A. Blondel, Rapport sur les unités photométriques, *ibid. L'éclairage électrique*, p.343.

celle-ci multipliée par un certain coefficient d'effet physiologique, inconnu mais constant pour une composition spectrale donnée.¹⁴¹

On peut donc définir les autres grandeurs à partir de leur définition physique en les multipliant par ce coefficient d'effet physiologique qui n'est constant que pour une lumière isochrome. Blondel se doit d'ajouter :

Grandeurs photométriques.	Symboles (caractères antiques).	Définition.
Quantité de lumière.....	\mathfrak{Q}	$\mathfrak{Q} = k\varepsilon,$
Flux lumineux.....	Φ	$\Phi = \frac{\mathfrak{Q}}{\sigma},$
Éclairement.....	\mathfrak{E}	$\mathfrak{E} = \frac{\Phi}{s},$
Intensité ou puissance lumineuse.....	\mathfrak{I}	$\mathfrak{I} = \frac{\Phi}{\sigma},$
Éclat (intrinsèque).....	\mathfrak{I}	$i = \frac{l}{s \cos \alpha}$
Rayonnement ou éclairement intrinsèque.	\mathfrak{E}	$\mathfrak{E} = \frac{\Phi}{s}.$

σ désigne un angle solide,
 ε l'énergie,
 k un coefficient inconnu,
 α l'angle d'émission des rayons par rapport à la normale.

fig. 5.14 – Les unités photométriques et de leurs symboles proposés par Blondel. D'après A. Blondel, *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, 1896, vol. 13, p. 357.

On remarquera seulement que, si la lumière considérée n'est plus monochrome mais polychrome, le rapport entre le flux photométrique et le flux physique n'est plus le même que pour une lumière monochrome, mais varie suivant la source considérée;¹⁴²

Cette dernière remarque ne signifie pas pour autant que Blondel souhaite évacuer la question de la photométrie hétérochrome. Blondel connaît parfaitement les travaux de Macé de Lépinay et de Nicati dont il a déjà fait état au congrès de Chicago ainsi que les travaux que Crova qui ont conduit à la définition du *degré d'incandescence*. Il sait également que les mesures photométriques sur les sources colorées conduisent à des résultats différents selon

141. A. Blondel, Rapport sur les unités photométriques, *ibid.* *L'éclairage électrique*, p. 343.

142. A. Blondel, Rapport sur les unités photométriques, *op. cit.* *L'éclairage électrique*, p. 344.

que l'on procède par la méthode *d'égale clarté* ou par la méthode *d'égale acuité*. Il admet, comme Auguste Charpentier (1852-1916) qui fut l'assistant d'Edmond Landolt, que cela tient à la sollicitation de deux fonctions différentes de la vue qui « ne suivent pas la même loi de variation quand on fait varier l'intensité réelle. »¹⁴³ Les deux points de vue (égale clarté et égale acuité) doivent donc être pris en compte dans la définition des unités :

Les étalons secondaires ne peuvent plus être définis, en fonction de l'étalon primaire international, par un seul chiffre ; il en faut deux exprimant respectivement :

La valeur de l'étalon en pyrs d'unité lumineuse ou de clarté ;

La valeur de l'étalon en pyrs d'intensité visuelle ou d'acuité.

Pour les sources de teinte jaune, la différence entre le nombre de pyrs de clarté et le nombre de pyrs d'acuité est peu importante. Mais il n'en est plus de même pour les sources à rayons très réfrangibles, telles que l'arc électrique ; la différence devient alors notable, et il paraît indispensable de distinguer les deux valeurs.¹⁴⁴

Les propositions de Blondel présentées au Congrès de Genève furent examinées par une commission présidée par Von Hefner Altenek. Cette dernière les a adoptées et son président a même fait adresser à Blondel un télégramme de félicitations pour l'œuvre accomplie. Le Congrès apporta cependant des modifications sur la pertinence desquelles on peut s'interroger : pourquoi choisir comme grandeur fondamentale l'intensité lumineuse au lieu du flux lumineux si ce n'est pour pérenniser une habitude privilégiant une *intensité* pouvant être comprise dans de multiples sens. La « quantité de lumière » directement liée à l'énergie se trouve remplacé par le terme « éclairage » pour le moins imprécis. Quant à la « bougie décimale » qui décidément a la vie dure, elle envoie, au grand dam de Blondel, le « pyr » aux oubliettes de l'histoire. Que n'a-t-il proposé la « Candela » ?¹⁴⁵

143. A. Blondel, *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, [Blo96], p. 361.

144. A. Blondel, *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, [Blo96], p. 362.

145. La remarque de Blondel sur ce point est savoureuse : « On a fait valoir contre le mot «Pyr» la difficulté que trouveraient les marchands de lampes à l'usage d'un mot nouveau. Mais on a oublié, je pense, que les paysans de tous les pays latins et allemands, malgré leur culture fort inférieure (sic), se sont fort bien accoutumés au système métrique, qui présente bien plus de complications qu'un simple changement de nom. » A. Blondel « Sur les unités photométriques. » *Journal de physique théorique et appliquée*, 1897, 6 (1), p. 192.

En dépit de leur clarté et de leur modernité¹⁴⁶ il n'est pas certain que les idées de Blondel soient sorties de la sphère francophone. Le Congrès de Genève n'étant pas un congrès officiel, le nombre de délégations était réduit et les possibles contradicteurs américains et britanniques n'avaient pas fait le déplacement. Cela n'a pas empêché un observateur d'outre-Atlantique de dénoncer le manque de représentativité du Congrès, allant jusqu'à blâmer l'amateurisme de son organisation. Le même regrette l'impossibilité, une fois encore, de définir un étalon de lumière, confondant lui aussi *étalon primaire* et *étalon pratique*¹⁴⁷ !

Blondel est bien conscient que ces propositions sont insuffisantes pour faire de la photométrie une science complète. Il lui faut agrandir sa collection d'instruments pour caractériser complètement et avec efficacité les sources lumineuses. Le rayonnement d'une source n'est en général pas isotrope ce qui signifie que l'intensité mesurée dans une direction donnée aura une autre valeur dans une autre direction. Rousseau, professeur à l'université libre de Bruxelles avait déjà fait remarquer au congrès de 1881 qu'il fallait déterminer la formule photométrique des foyers électriques, c'est à dire la relation entre l'intensité lumineuse et la direction des rayons. L'ingénieur du Service des phares Blondel est coutumier de la question et il sait que le tracé des « indicatrices d'émission » est un travail long et fastidieux. Heureusement, la caractérisation des sources du commerce peut se contenter de la détermination de leur flux total rayonné ou, « ce qui revient au-même, de leur intensité moyenne sphérique »¹⁴⁸ ce qui donne directement la moyenne des intensités qui seraient mesurées point par point dans toutes les directions de l'espace.

Blondel va consacrer plusieurs années — il parle d'un travail commencé en 1891 dont l'aboutissement sera publié en 1895 — pour mettre au point l'instrument dédié à cette mesure et qu'il appelle le « lumenmètre ».

Le principe de la méthode se résume ainsi : la source à photométrer L est placée au foyer d'un réflecteur M. Un écran opaque B intercepte les rayons directs tandis que la moitié du flux lumineux, émis dans l'autre hémisphère (gauche) est réfléchi par M vers un écran parfaitement diffusant G dont l'éclairage est observé avec le photomètre placé en P. On mesure ainsi la moitié du flux. L'autre moitié est obtenue par une simple rotation de la lampe, de

146. La photométrie est présentée, encore aujourd'hui, selon les idées de Blondel, si tant est qu'elle soit toujours enseignée dans les licences de physique qui pour beaucoup d'entre elles privilégient les manipulations d'opérateurs *quantiques* !

147. *The electrical world*, 1896, vol. 28, n° 10, p. 270.

148. A. Blondel, « La détermination de l'intensité moyenne sphérique des sources de lumière », *L'éclairage électrique*, 1895, vol. 2, n° 9, p. 385-391.

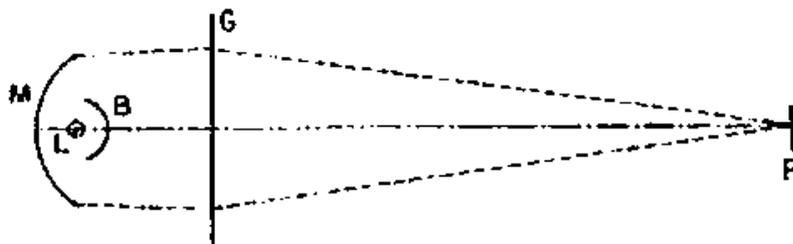


fig. 5.15 – Principe de la mesure de l'intensité moyenne sphérique. D'après A. Blondel, *L'éclairage électrique*, 1895, vol. 3, n° 22, p. 412.

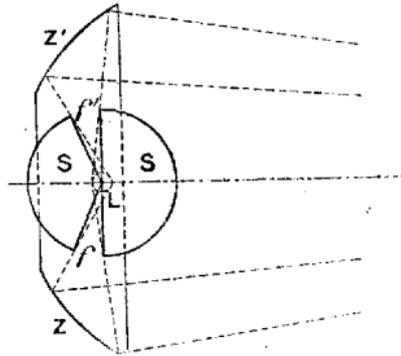
180° autour de l'axe vertical (perpendiculaire au plan de la figure, fig. 5.15) passant par le foyer.

Malheureusement, Blondel constate une variation relativement importante du pouvoir réflecteur du projecteur, en fonction de l'incidence. Pour obvier à cet inconvénient, Blondel choisit de réduire la zone utile du projecteur à une zone ZZ' , de façon à ce que l'angle d'incidence reste constant. Dans l'appareil, la lampe L peut tourner autour de son axe perpendiculaire au plan de la figure (fig. 5.15). Elle est entourée d'une sphère opaque SS' où sont ménagées deux ouvertures limitant deux fuseaux symétriques f et f' . Les faisceaux lumineux limités par f et f' sont réfléchis par la zone ZZ' vers un écran diffuseur. ZZ' délimite une portion d'un ellipsoïde de révolution dont les deux foyers sont situés d'une part au centre de la sphère SS' d'autre part à 3 m de distance. On obtient ainsi sur l'écran diffusant une tache de petite dimension. Il faut aussi une source de référence pour la comparaison photométrique. L'angle délimitant chacun des deux fuseaux vaut 18°. Dix mesures permettent ainsi de cartographier le flux.

Pour conclure, on ne peut éviter de faire un parallèle entre les travaux d'André Blondel et ceux réalisés par Augustin Fresnel, près d'un siècle plus tôt. Tous deux sortis de l'École des ponts et chaussée ont effectué leur service en travaillant aux progrès de la photométrie pratique, à la Commission des phares pour Fresnel, au Service des phares et balises pour Blondel. Tous deux ont travaillé à l'évaluation des performances des projecteurs. En dépit des opinions formulées sur la stagnation de la photométrie pendant le siècle, la comparaison des techniques opératoires décrites par Fresnel pour l'éclairage des côtes de France¹⁴⁹ avec les documents techniques produits par Blondel pour l'éclairage public par les lampes à arcs¹⁵⁰ montre clairement l'évolution

149. A. Fresnel, *OC*, tome 3, Paris, Imprimerie impériale, 1870.

150. A. Blondel, *L'éclairage public par les lampes à arc*, Publications du journal *Le génie civil*, Paris, 1895.



LÉGENDE : Coupe horizontale schématique d'un lumen-mètre à zone.
ZZ' zone ellipsoïdale réfléchissante;
SS' sphère opaque percée suivant deux fuseaux f, f' ;
L source de lumière à photométrer.

fig. 5.16 – Schéma de principe du Lumen-mètre de Blondel. D'après A. Blondel, *CRAS*, 1895, vol. 120, p. 552.

des techniques photométriques pendant une période couvrant soixante-dix ans. La difficulté des mesures soumises à de nombreuses perturbations, la rudesse des calculs effectués par les deux ingénieurs témoignent de la difficulté des problèmes qu'ils ont dû résoudre et montrent que la photométrie est une science à part entière, loin de la simplicité qu'on lui prête parfois.

5.7 1900 : la Commission internationale de la photométrie

Le siècle se termine par l'organisation à Paris d'une nouvelle exposition internationale. À cette occasion, vont se réunir de nouveau en congrès les Électriciens du monde entier. Le raout scientifique se déroulera du 18 au 25 août 1900 dans la grande salle du Palais des Congrès. On est frappé, à l'observation du programme provisoire de voir à quel point celui-ci s'est étoffé par rapport au programme de l'année 1881. Production et transports de l'énergie électrique, traction électrique, métallurgie électrique (en particulier fabrication de l'aluminium, affinage du cuivre,...), télégraphie, téléphonie, réseaux, horlogerie électrique, mais aussi télégraphie sans fil, etc. Même la « télévision au moyen de l'électricité » sera l'objet d'une communication (Perskyi, séance du 24 août 1900). C'est la première section du congrès qui s'intéressera aux problématiques des mesures et en particulier de la photométrie. Là, le programme est mince : « Étalons secondaires - Comparaison des divers étalons -

Méthodes et appareils de mesure. »¹⁵¹ Au moins, ce programme a-t-il le mérite de ne pas remettre en cause l'unité de lumière et sa réalisation, l'étalon Violle.

Cette brièveté du programme ne doit pourtant pas masquer la technicité des questions photométriques qui vont être abordées pendant le congrès, technicité qui apparaît dans le rapport préliminaire d'André Blondel sur « Les progrès des lampes électriques »¹⁵². Ces progrès concernent autant les lampes à arc que les lampes à filaments de carbone. Il s'agit en premier d'évaluer le rendement de chacune des solutions d'éclairage, en terme de consommation électrique (en watts) par bougie (ici la bougie décimale, bd, adoptée au congrès de 1889). Dès lors, doivent être précisés les protocoles de mesure des flux lumineux qui diffèrent selon les habitudes adoptées dans chaque pays et les unités employées : en France, la *bougie décimale*, en Allemagne et en Amérique, le *hefner* qui représente $\frac{88}{100}$ de la première. Du coup, les lampes étrangères affichent des nombres plus avantageux que les lampes françaises. Et Blondel poursuit :

Il n'y a pas moins de désaccord sur la définition de la puissance lumineuse des lampes et la façon de la mesurer.

En France, jusqu'ici, on prend l'intensité horizontale dans une direction perpendiculaire au plan moyen du fer à cheval ou de la boucle. Mais, à l'étranger, on déclare que les essais, pour être utiles, doivent comprendre la mesure de la puissance lumineuse dans plusieurs directions.(...) et un récent règlement de cette Association [l'*American Institute*] exige que les lampes à incandescence soient conformes à la fois à une valeur étalon pour la puissance lumineuse moyenne normale et à une moyenne sphérique mesurée lorsque la lampe tourne à une vitesse très lente, avec son axe incliné à 45°. ¹⁵³

Blondel conclut son rapport en indiquant que seule la mesure du flux lumineux total permet de photométrer convenablement les lampes mises sur le marché. Il préconise à cette fin les nouveaux appareils dont dispose la photométrie : le lumen-mètre et la sphère intégrante d'Ulbricht. Celle-ci « consiste dans une sphère parfaitement blanchie intérieurement ; l'éclat intrinsèque est

151. Édouard Hospitalier, *Congrès international d'électricité (Paris, 18-25 août 1900). Rapports et procès-verbaux*, Paris, Gauthier-Villars, 1901, p. 6.

152. A. Blondel, « Les progrès des lampes électriques », *Congrès international d'électricité (Paris, 18-25 août 1900). Rapports et procès-verbaux*, Paris, Gauthier-Villars, 1901, p. 210-269.

153. A. Blondel, *ibid.*, p. 247.

le même sur toute la surface intérieure et donne par proportionnalité une mesure du flux lumineux qu'on y enferme. »¹⁵⁴

Le rapport préliminaire de Violle sur la « Photométrie » est non moins intéressant et fait un bilan de tous les travaux effectués pour l'amélioration des méthodes de mesures, en raison des nouvelles exigences provoquées par l'apparition de la lumière électrique¹⁵⁵. Il s'étend sur les travaux de Lieben-thal et sa description des lampes à filament utilisées comme étalons secondaires ainsi que les études menées par l'Allemand sur les étalons à flamme. Violle signale une nouvelle venue dans ce groupe : la flamme de l'acétylène sur laquelle il a lui-même publié¹⁵⁶. Violle donne une description précise des nouveaux photomètres comme celui de Lummer et d'Eugen Brodhun (1860-1938) dont l'écran de visualisation offre une nette ligne de séparation entre les deux plages observées et comme le *photomètre universel* de Blondel et Broca, « qui permet de faire toutes les mesures utiles en Photométrie : intensité, éclairagements, éclats, (...) Enfin on peut substituer aux écrans diffusifs des objets convenables pour remplacer l'étude des égales clartés par celle des égales acuités. »¹⁵⁷

Ces rapports consignés intégralement dans les procès-verbaux du Congrès des électriciens, tenu à Paris en 1900 constituent des sources très appréciables pour évaluer l'évolution de la photométrie pendant tout le siècle et l'état des savoirs de ce champ disciplinaire, à l'entrée dans le XX^e. Ce n'est pas beaucoup s'avancer que de considérer ces progrès comme fortement corrélés aux développements des industries gazière et électrique. Mais la photométrie reste la photométrie, la science qui mesure la lumière *visible* et qui utilise, par définition, le même organe de mesure : l'*œil*.

À côté des assemblées officielles : Congrès internationaux des électriciens de Paris en 1889 et de Chicago en 1893, de Paris à nouveau, en 1900, convoquées à l'occasion des expositions internationales, il faut remarquer d'autres rassemblements ne bénéficiant pas toujours d'un patronage gouvernemental. Du 3 au 5 septembre 1900, se tient toujours à Paris, à l'occasion de l'Exposition universelle, le Congrès international de l'Industrie du gaz. Ce rassemblement, à l'initiative de la Société Technique de l'Industrie du Gaz en France réunit un panel important de cadres et d'ingénieurs de l'industrie gazière mondiale. Les discussions sont arbitrées par Théodore Vautier, lui-même président de Société Technique de l'Industrie du Gaz en France.

Vautier est un ingénieur centralien, issu de la bourgeoisie protestante et

154. A. Blondel, *ibid.*, p. 249.

155. J. Violle, « Photométrie », *Congrès international d'électricité (Paris, 1900)*, p. 23-45.

156. J. Violle, « Un étalon photométrique à l'acétylène. », *CRAS*, 1896, vol. 122, p. 79-80.

157. J. Violle, *op. cit.*, p. 41.

industrielle de Lyon. Il est le fils de Paul-Émile Vautier (1818-1889) et de Jeanne Marie Virginie Dupasquier (1817-1862). Son père, Paul-Émile, était lui-même diplômé de l'École centrale des arts et manufactures. Il s'était lancé dans l'industrie du gaz, avait fondé la Société technique du gaz en 1873 et était parvenu à créer un groupe industriel de plus de vingt sociétés. Il faisait partie des fondateurs du Crédit Lyonnais. Avant de prendre la direction du groupe Vautier, à la mort de son père, Théodore commence en 1879 une activité de recherche en physique, dans le laboratoire de Jules Violle qui vient d'être nommé à Lyon. Ses travaux sont couronnés par une thèse de doctorat en 1888¹⁵⁸. Théodore Vautier commence ainsi une carrière d'enseignant-chercheur, à la faculté des sciences de Lyon. Il participe aussi activement à l'administration de l'École centrale de Lyon¹⁵⁹.

Le rôle fédérateur d'Émile et de Théodore Vautier dans l'industrie du gaz en France explique le poste important de Théodore au sein de la Société technique du gaz et sa présidence du Congrès international de l'Industrie du gaz. Alors que le Congrès international des électriciens réunis, une semaine auparavant sous les auspices du ministre du Commerce, de l'Industrie, des Postes et des Télégraphes vient de terminer ses travaux, l'assemblée des industriels du gaz, en ce 3 septembre 1900, va émettre une résolution décisive :

« Le Congrès international de l'Industrie du Gaz,
« Considérant qu'il est de l'intérêt général et commun des producteurs aussi bien que des consommateurs de gaz d'être exactement renseignés sur le pouvoir éclairant des becs employés pour l'éclairage à incandescence.
« Décide :
« Une Commission internationale sera nommée à l'effet de fixer les règles à suivre dans les observations photométriques des becs à incandescence par le gaz ;
« Le Bureau du Congrès est chargé de procéder à l'organisation de cette Commission internationale. »¹⁶⁰

Résolution décisive mais qui reste restrictive puisque sa portée se limite à

158. Th. Vautier, « Recherches expérimentales sur la vitesse d'écoulement des liquides par un orifice à mince paroi », *ACP*, 1888, sér. 6, vol. 15, p. 289-375 et « Application de la méthode graphique à l'étude de la vitesse d'écoulement des liquides visqueux », *ACP*, 1888, sér. 6, vol. 15, p. 433-498.

159. Sur la biographie de Théodore Vautier, voir la notice nécrologique publiée par le *Bulletin mensuel de l'Association des anciens élèves de l'École centrale lyonnaise*, n° 262, Janvier - Février 1931, p. 68-70

160. Société technique de l'Industrie du gaz en France, Congrès international de l'Industrie du gaz, Paris, 1900, *Comptes rendus des travaux*, Paris, 1900, p. 88.

la photométrie des corps incandescents de type *bec Auer*. Alors qu' à partir de 1880, l'industrie gazière subit de plein fouet la concurrence de l'éclairage électrique et semble amorcer un déclin, l'invention d'un manchon à incandescence performant par Carl Auer Freiherr von Welsbach (1858-1929) lui donne un second souffle. Le manchon est un tissage formé de divers oxydes (thorium, cerium) réfractaires qui deviennent incandescents sous l'effet de la chaleur produite par une flamme. La lumière produite est vive et blanche. Commercialisés à partir de 1892, les manchons de la marque Auer connaissent un succès immédiat et envahissent le marché des luminaires au détriment des becs à flamme nue. Photométrer ces nouvelles sources de lumière concurrentielles avec les sources à incandescence électrique est un contrôle essentiel pour les ingénieurs du gaz.

Le lendemain, mardi 4 septembre, dans l'après-midi, Vautier, au nom du bureau du Congrès, donne la composition de la nouvelle commission qui comprendra quatre membres pour l'Allemagne, quatre membres pour l'Angleterre, quatre membres pour la France et un membre pour représenter chacun des autres états possédant une industrie gazière conséquente : États-Unis, Autriche-Hongrie, Belgique, Hollande, Italie, Suisse. Il est également décidé du lieu de la prochaine réunion plénière de la Commission, la ville de Zürich. Toutes ces décisions prises à l'unanimité actent la naissance de la *CIP* ou « Commission internationale de la photométrie », sans que soit invoquée la moindre instance gouvernementale.

Les trois premières réunions plénières de la CIP se tiendront effectivement à Zürich en 1903, 1907 et 1911. L'importance du nombre d'acteurs intéressés à la photométrie, ingénieurs électriciens, ingénieurs éclairagistes,... entraîna une refonte des statuts de la Commission dont les membres ne pouvaient plus seulement être issus de l'industrie gazière. Le Congrès de Berlin de 1913 adopta les nouveaux statuts et l'élargissement des domaines d'activité de la nouvelle commission ainsi baptisée la « Commission internationale de l'éclairage » et désigné communément par ses initiales *CIE*. L'organisme est ouvert aujourd'hui, au sein de comités et d'associations nationaux à tous les acteurs, ingénieurs, chercheurs, entrepreneurs impliqués dans les questions de la vision (photométrie, colorimétrie), de la reproduction des couleurs (système de visualisation), de l'éclairage et de la signalisation. Il fait bénéficier aujourd'hui le BIPM occupé, quant à lui, à la métrologie physique, de son expertise dans le champ de la métrologie sensorielle, deux branches de la science des mesures que l'on ne saurait opposer l'une à l'autre, tant elles sont complémentaires.

Conclusion

Notre histoire de la photométrie, en France, au XIX^e siècle s'est attachée à répondre à la question suivante : la photométrie est-elle sortie de l'histoire, pendant ce siècle où paradoxalement l'industrie de la lumière artificielle prend son envol ? L'opinion d'une science « restée à l'état stationnaire » et qui n'aurait pas su réformer « la phraséologie qu'elle a reçue du XVIII^e siècle » émise par deux grands savants, François Arago et André Blondel, semble y répondre par l'affirmative. Notre recherche a permis de mettre en évidence une évolution de cette science avec des dynamiques différentes selon l'utilisation qui en était faite. Il apparaît que l'histoire de la photométrie peut se scinder en trois récits amenés à se croiser : l'histoire d'une photométrie physique et astrophysique, celle d'une photométrie appliquée et industrielle, celle de la photométrie physiologique.

La première histoire, initiée ici par les travaux de Bouguer raconte comment ce dernier a pensé et exposé en physicien les premières lois et méthodes de gradation de la lumière qui formeront les bases de la photométrie : loi de la décroissance de la « force » de la lumière comme l'inverse du carré de la distance (loi déjà connue qu'il redémontre, dans le cas, il le dit bien, d'une source vue comme ponctuelle à grande distance), loi de la décroissance de la « force » de la lumière, à la traversée d'un milieu diaphane, selon ce qu'il nomme une « gradulucique » (une exponentielle décroissante). Il définit aussi la « numératrice des aspérités » d'une surface lumineuse et découvre avant Lambert le concept de « source lambertienne ». La méthode — *un nouvel Art* — que développe Bouguer pour comparer les sources lumineuses utilise la capacité de l'œil à juger de l'égalité de deux lumières. Le réglage des distances entre les sources et l'observateur s'arrête dès que la différence d'apparences n'est plus perceptible : c'est une méthode dite « de zéro ». Il définit sans ambiguïté les conditions de sa pratique : « nous laissons à part tout ce qu'il y a de *Métaphysique* dans la sensation »¹⁶¹. Ce faisant, il bannit de sa mesure l'affect, la psychologie, ce qui est en dehors de la physique. Bouguer se sert

161. Pierre Bouguer, *Traité d'Optique sur la gradation de la lumière*, La Caille, Paris, 1760, p. 3-4.

de l'œil comme d'un instrument de mesure objectif : il fait de la physique ! Le professeur d'hydrographie, en bon observateur de la mer et des astres, en particulier de la Lune, applique cette physique à diverses questions de son temps comme « Trouver combien la lumière des astres augmente ou diminue, par les changements de leurs hauteurs au-dessus de l'horizon »¹⁶² ou comparer la lumière du Soleil à celle de la Lune. Les fondations de la photométrie de Bouguer seront suffisamment solides pour se maintenir pendant la totalité du XIX^e siècle. Arago et Fresnel les utiliseront pour leurs expertises des projecteurs de phares. Mais érigée en principe, peut-être la méthode du Breton ne sera-t-elle pas suffisamment remise en cause, empêchant par là les évolutions nécessaires, attendues par Arago qui met en doute les estimations de la photométrie *bouguerienne*, trop dépendante des lumières inconstantes des bougies, des chandelles et des lampes d'Argand.

La découverte, par l'officier du génie Louis-Étienne Malus, de la polarisation de la lumière par réflexion vitreuse va offrir à la photométrie des instruments nouveaux. Les physiciens découvrent que les rayons de la lumière naturelle sont le plus souvent polarisés, en raison des nombreux accidents émaillant leur parcours ! La prospérité de cette découverte ne viendra pas de Malus mais sera le fait d'Arago qui découvre la polarisation chromatique et de son collègue Jean-Baptiste Biot qui découvre la polarisation rotatoire. Des travaux de Biot naîtra une nouvelle science : la polarimétrie. Quant à Arago, armé de la lunette *polariscope* qu'il a inventée, il étudiera l'état de polarisation de l'atmosphère terrestre et des atmosphères stellaires, inaugurant aussi une nouvelle science : l'astrophysique. Les histoires de la photométrie en lumière polarisée n'ont souvent retenu que le seul nom de William Nicol. Or, il est apparu opportun de le rappeler, c'est à Arago que l'on doit cette nouvelle méthode de gradation de la lumière, associant un polariseur (Arago utilise une pile de glaces) et un analyseur (Arago se sert d'un cristal de spath). En démontrant expérimentalement la loi dite du « cosinus carré » pour tous les angles, Arago a rendu légitime cette nouvelle méthode pour la mesure d'une intensité lumineuse. La photométrie d'Arago reste dédiée à des questions de physique fondamentale, comme l'établissement des tables des lumières transmises et réfléchies par une lame à faces parallèles ou de la lumière réfléchie par un miroir, en fonction de l'angle d'incidence. Elle sera également dédiée à l'astronomie. Membre du Bureau des longitudes, astronome de l'Observatoire de Paris, Arago a bénéficié de moyens importants pour développer une instrumentation photométrique à la pointe de l'innovation. Celle-ci utilise les précieux composants de l'optique cristalline : lame de quartz, prisme de Rochon, prisme de Nicol, taillés dans les ateliers de fabricants talentueux

162. Bouguer, Essai, p. 22.

(Jean-Baptiste Soleil et Jules Duboscq). En associant une lunette prismatique de Rochon à un prisme de Nicol, Arago pourra se livrer à la mesure des magnitudes des étoiles. L'idée sera plus tard empruntée par Pickering pour l'établissement des magnitudes du grand catalogue d'Harvard.

À côté de l'histoire de cette photométrie physique qui utilise tous les raffinements de la haute optique, la photométrie terrestre, celle qui se consacre aux moyens d'éclairage, reste attachée à la « méthode des ombres ». Comme cela a été souligné dans cette recherche, dans le premier XIX^e siècle, les ingénieurs de l'industrie gazière n'utilisent pas le terme « photomètre » quand ils comparent les pouvoirs éclairants des différents combustibles soumis à leur expertise. Ils expriment souvent la défiance que leur inspirent les résultats des comparaisons photométriques. Pour autant, l'étude des comptes rendus d'essais sur les gaz tirés de la résine de pin et du *suinter* (corps gras extrait du lavage de la laine de mouton) attire l'attention sur l'amélioration des procédures de la photométrie gazière. L'ensemble peu exploré de ces documents montre que la photométrie, avant la fin de la première moitié du siècle, est déjà entrée dans l'ère du contrôle industriel, sous les auspices de sociétés regroupant des ingénieurs civils et des industriels, soucieux autant de précision que des rendements de leurs filières. Ainsi de la Société pour l'encouragement de l'industrie nationale et de la Société industrielle de Mulhouse, engagées dans le processus d'industrialisation du pays. Rapidement, sous le patronage d'un pouvoir impérial, fidèle à sa promesse d'une lumière à un juste prix, la normalisation se met en place, conduite par des savants renommés (Pouillet, Foucault, Dumas, Regnault) et le Bureau municipal de Paris, chargé de la vérification du gaz, peut s'enorgueillir d'un « étalon légal ou mesure type du pouvoir éclairant du gaz ».

Il a été dit, en exorde de cette étude, que l'histoire de la photométrie se croisait avec celle de la vision. La question de la comparaison en intensité de lumières chromatiquement différentes fait effectivement intervenir des phénomènes psychologiques (le contraste simultané) et physiologiques qui ne peuvent être contournés que par des artifices. Ainsi en est-il de l'effet Purkyně qui empêche l'obtention de résultats incontestables pour de telles comparaisons et semble rendre illusoire les efforts de création d'une métrologie photométrique. À la fin du siècle, relever ce défi mobilise trois disciplines : la photométrie, la physiologie et la psychologie. La contribution que nous avons voulu apporter à cette histoire du croisement des « trois P » est la mise en lumière des recherches menées à Marseille par le physicien Jules Macé de Lépinay et le médecin ophtalmologiste William Nicati, à Montpellier par les physiciens André Crova et Charles-Henri Lagarde. En particulier, les données collectées par Macé de Lépinay et Nicati quantifient l'effet Purkyně qui

se manifeste pour les radiations les plus réfrangibles du spectre et montrent que les résultats obtenus par la méthode des ombres et par la méthode des acuités accusent des différences de plus en plus marquées, au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue. Mieux, les nombres de Macé de Lépinay et Nicati définissent les pouvoirs éclairants de la lumière solaire, pour les différentes longueurs d'onde. Nous avons eu l'idée de croiser ces valeurs avec la distribution spectrale de l'énergie rayonnée par la lumière solaire, à la surface de la Terre¹⁶³. Nous avons obtenu ainsi une représentation du pouvoir éclairant monochromatique pour 1 watt, représentation très proche de celle de la fonction de visibilité $V(\lambda)$, obtenue par Gibson et Tyndall de l'US Bureau of Standards et acceptée par la CIE en 1924, pour définir l'« observateur photométrique de référence ». Cette constatation montre la valeur des méthodes mises en œuvre par l'équipe de Marseille, quarante années avant les travaux des deux ingénieurs américains.

Notre histoire de la photométrie devait rappeler, en conclusion, les efforts déployés en France, à la fin du siècle, pour doter la photométrie d'un étalon de lumière et nantir les grandeurs qu'elle manipule de définitions précises et stables. Nous avons voulu mettre en lumière, dans cet esprit, les travaux de Jules Violle et d'André Blondel. Au congrès international des électriciens de 1881, à Paris, la définition d'un étalon de lumière reste en suspens en raison de l'incertitude des jugements photométriques pour des lumières diversement colorées. Quelle confiance attribuer à la comparaison visuelle de la lumière bleutée de l'arc électrique avec la lumière jaunâtre de l'étalon Carcel défini par Dumas et Regnault ? En France, les efforts entrepris par Jules Violle et André Blondel vont apporter une solution, au moins provisoire à cette question. Jules Violle va proposer un étalon primaire (la lumière émise par 1 cm² de la surface du platine en cours de congélation), proposition définitivement adoptée lors de la seconde session de la Conférence internationale des unités électriques, en 1884. Le Congrès international des électriciens, réuni à Paris en 1889, entérinera comme unité pratique, la bougie décimale, définie comme 1 bd = $\frac{1}{20}$ violle. L'étalon Violle adopté par les réunions internationales de 1884, 1889 et 1900 ne sera pas, pour autant, reproduit par les laboratoires nationaux, en dehors de France. Les laboratoires étrangers se contenteront d'étalons secondaires pour la photométrie pratique : l'Allemagne restera viscéralement attachée à la bougie Hefner (HK), pendant de longues années encore, tandis qu'au Royaume-Uni, seront privilégiées les lampes électriques étalons, à filament incandescent. Si notre travail s'est intéressé aux arguments opposés à l'étalon Violle, il a aussi voulu appeler l'attention sur les expertises menées par Joseph Petavel du National Physical Laboratory, de 1896 à

163. Distribution qui correspond à l'illuminant D65 normalisé par la CIE.

1899, qui montrent la reproductibilité de l'étalon Violle avec une variabilité inférieure à 1%.

André Blondel, quant à lui, démontrera, au congrès international des électriciens de Chicago (1893), la valeur de son arc étalon en tant qu'étalon secondaire, pour expertiser la lumière de l'arc électrique. Que ce soit le cratère de l'arc électrique ou la surface du platine fondu, ces objets sont directement connectés aux thématiques de la recherche fondamentale, à cette époque : la mesure des hautes températures, la recherche de matériaux réfractaires, la photométrie des lampes à incandescence, la pyrométrie enfin, recherches impliquant aussi des personnalités importantes de la chimie : Marcellin Berthelot, Henri Le Chatelier et Henri Moissan. Dans un rapport publié par la Société internationale des électriciens, à l'occasion du congrès des électriciens de Genève, en 1896, Blondel, enfin, présentera le système des grandeurs fondamentales, nanties de leurs unités, de la photométrie. Il proposera pour unité d'intensité lumineuse le *pyr*. Il donnera les règles essentielles pour des mesures photométriques fiables, en particulier la nécessité de définir les valeurs des étalons secondaires en « pyrs de clarté » ou en « pyrs d'acuité », selon les cas, faisant ainsi état des travaux de Macé de Lépinay et de Nicati.

En 1913, dans le journal *La houille blanche*, Adrien Bochet (1863-1922) proclame l'« origine française » de la photométrie¹⁶⁴. Et d'alléguer les noms de Bouguer et de Lambert, en oubliant, dans son élan patriotique, que Lambert se pensait plutôt citoyen de la cité-état de Mulhausen. La revendication de cet ingénieur de l'École centrale des Arts et Manufactures (1883-1886), spécialiste des projecteurs et ingénieur en chef chez Sautter-Lemonnier, ne pouvait qu'inciter à interroger l'histoire de la photométrie, pour donner un éclairage plus complet sur les jalons posés en France, par les photomètres du siècle de la lumière artificielle. Notre travail a ainsi voulu démontrer leurs implications dans la création de la photométrie astrophysique, de la photométrie industrielle et évaluer la place qu'ils ont réservée à une métrologie photométrique « ab ovo », entre la métrologie physique et la métrologie sensorielle.

La fondation de la Commission internationale de la photométrie en 1900 est le point final de notre étude. Mais l'histoire de la photométrie que nous avons esquissée mérite un travail plus complet, amené forcément à sortir du cadre temporel et spatial, présenté dans ces pages. Les voies de recherches à explorer sont nombreuses. Il reste, par exemple, à étudier les réponses apportées à la question de la photométrie hétérochrome et à celle de la précision de la fonction de visibilité $V(\lambda)$. ou « luminosité monochromatique du watt »

164. Adrien Bochet, « Éclairage électrique - Grandeurs et unités photométrique », *La houille blanche*, 1913, n° 6, p. 152.

qui définit, pour chaque longueur d'onde, le coefficient entre la puissance radiante (grandeur physique) et le flux lumineux (grandeur visuelle), coefficient dont André Blondel, encore, appelle la détermination par des études physiologiques. Thoverl propose par exemple le remplacement de $V(\lambda)$ par une fonction algébrique¹⁶⁵.

Une autre question concerne la photométrie en régime dynamique, qui s'intéresse à la mesure des sensations visuelles, provoquées par les lumières brèves. Les enjeux sont importants tant pour la signalisation terrestre que maritime et aérienne. Cette problématique que nous avons abordée par l'œuvre de Masson bénéficie de matériaux intéressants : les travaux qu'Émile Allard a consacrés aux feux à éclats¹⁶⁶, les études menées par André Blondel et Jean-Alexandre Rey (1861-1935)¹⁶⁷, les recherches d'André Broca et de David Émile Sulzer¹⁶⁸, etc. Tous ces travaux forment un fonds important, susceptible de révéler des aspects inédits de la photométrie.

Il reste aussi à s'intéresser à la prospérité, au siècle suivant, des propositions concernant la réalisation de l'unité de lumière, en particulier celle du remplacement de l'étalon Violle par le rayonnement du *radiateur intégral*, observé à la température de solidification du platine. Cet objet appelé plus communément « corps noir » par les physiciens est, de tous les corps, celui qui, à une température donnée, rayonne le plus. Il est savoureux de noter que le corps noir a été choisi comme étalon de lumière ! La réalisation selon cette idée d'un étalon primaire de lumière va donner lieu à d'intenses recherches jusqu'au deuxième conflit mondial. La définition de l'unité d'intensité lumineuse, la Candela, et sa réalisation par le rayonnement du corps noir sera validée en 1948, par la 9^e Conférence générale des Poids et Mesures. Pour autant la reproduction de la Candela ne sera pas sans soulever quelques difficultés soulignées par plusieurs laboratoires nationaux. Ceux-ci font état d'une dispersion de 1% de la valeur du standard¹⁶⁹, dispersion finalement moins bonne que celle de l'étalon Violle. Comme l'avait déjà suggéré Helmholtz en 1882, force sera de définir l'unité de lumière par une radiation simple, monochromatique, la radiation verte de longueur d'onde 555 nm correspondant

165. J. Thoverl, « Photométrie physique », *Le journal de physique et le radium*, 1930, sér. 7, tome 1, n° 4, p. 121-125.

166. É. Allard, « Mémoire sur l'intensité et la portée des phares », *Annales des ponts et chaussées*, 1876, sér. 5, tome 12, p. 5-117.

167. A. Blondel, J. Rey « Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée », *Journal de physique théorique et appliquée*, 1911, tome 1, n° 1, p. 530-550.

168. A. Broca, D. Sulzer, « La sensation lumineuse en fonction du temps », *Journal de physiologie et de pathologie générale*, 1902, tome 4, n° 4, p. 632-640.

169. C. L. Sanders and O. C. Jones, « Problem of Realizing the Primary Standard of Light », *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, 52, p. 731-746.

au maximum de la fonction de visibilité $V(\lambda)$. Ces péripéties méritent une histoire des étalons photométriques, en se fondant notamment sur les divers rapports du comité consultatif de la photométrie (CCP), créé en 1933 par le Comité international des poids et mesures (CIPM)¹⁷⁰. Ce nouvel épisode de l'histoire de la photométrie pourrait se terminer lorsque le corps noir s'effacera devant le rayon vert¹⁷¹, pour que la Candela apporte enfin, selon le mot de Gaël Obein, « une touche d'humain dans les unités de mesures »¹⁷².

170. Sur l'organisation de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), lire *Le Système international d'unités (SI)*, BIPM, Sèvres, 2019; il est à noter que de 1930 à 1933, c'est le comité consultatif de l'électricité (CCE) qui s'est occupé des questions de photométrie.

171. En 1979, par décision de la 16^e Conférence générale des poids et mesures

172. Gaël Obein, « La candela, une touche d'humain dans les unités de mesure », conférence du jeudi 7 juin 2018, Laboratoire national de métrologie et d'essais.

Annexe A

Notions fondamentales de la photométrie

Dans ce qui suit, nous allons rappeler les définitions des grandeurs fondamentales utilisées en photométrie. La connaissance des termes et des notions employés par cette science est indispensable à la compréhension des principaux auteurs. La photométrie dans son sens premier est la mesure des rayonnements visibles par leur sensation visuelle. De façon plus large, il est également possible de mesurer l'énergie de tous les rayonnements, visibles et invisibles, par des capteurs objectifs, on parle alors de photométrie énergétique ou de *radiométrie*. Nous réserverons par la suite le terme *photométrie* à la photométrie visuelle et nous considérerons que le détecteur de rayonnement est l'œil de l'observateur.

L'étude de la photométrie se fait dans le cadre de *l'approximation de l'Optique géométrique*. Celle-ci repose sur la notion de *rayon lumineux* qui modélise la direction de propagation de l'énergie lumineuse. La lumière est censée se propager en ligne droite dans tout milieu homogène et isotrope : c'est le principe de *propagation rectiligne de la lumière*. Selon cette approche, il n'est pas tenu compte des phénomènes de diffraction qui se font jour dès que l'on essaye de réduire le faisceau lumineux à des dimensions proche de la longueur d'onde. De même, les rayons d'un même faisceau lumineux sont supposés incohérents, ce qui implique l'absence de phénomènes d'interférences. Diffraction et interférences lumineuses trouvent leur explication dans le cadre d'une théorie ondulatoire de la lumière appartenant à ce qu'il est coutume d'appeler *l'Optique physique*.

A.1 Sources lumineuses

Toute matière qui produit ou renvoie un rayonnement constitue une source lumineuse. On réserve le nom de *sources primaires* aux corps lumineux par

eux-mêmes qui émettent directement le rayonnement. Une étoile, le filament d'une lampe à incandescence peuvent être considérées comme des sources primaires. On appelle alors *sources secondaires* les corps qui renvoient la lumière qu'ils ont reçue. La surface lunaire, le verre dépoli entourant le filament d'une lampe à incandescence, une feuille de papier blanc éclairée par le soleil sont autant de sources secondaires.

Une source dite *ponctuelle* est telle que ses propres dimensions peuvent être considérées comme petite devant la distance à laquelle on examine ses effets. Dans le cas contraire, on parle de source *étendue*. Une étoile observée de la terre peut évidemment être considérée comme ponctuelle alors que ses propres dimensions sont considérables.

A.2 Grandeurs géométriques d'un faisceau lumineux

A.2.1 Angle solide

L'angle solide est la représentation de l'étendue géométrique d'un faisceau issu d'une source ponctuelle.

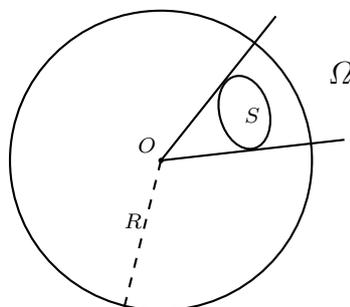


fig. A.1 – Angle solide

Soit O une source lumineuse ponctuelle. Une partie des rayons lumineux issus de O forme un cône de sommet O qui découpe une surface S sur une sphère de rayon R. La grandeur de ce cône est représenté par son angle solide Ω exprimé en *stéradians* et défini par :

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \quad (\text{A.1})$$

Dans le cadre de l'optique géométrique, la *quantité* de lumière contenue dans ce cône est proportionnelle à l'angle solide Ω . On déduit immédiatement de

cette définition que la quantité totale de lumière émise par la source O est proportionnelle à 4π

A.2.2 Angle solide élémentaire

Considérons l'angle solide $d\Omega$ qui intercepte l'élément de surface élémentaire dS dont la normale MN fait un angle α avec l'axe du cône OM. Cet angle solide intercepte aussi, à des infiniment petits du deuxième ordre près, la surface élémentaire prise sur la calotte sphérique de rayon OM égale à

$$d\Sigma = dS \cdot \cos \alpha \quad (\text{A.2})$$

L'angle solide élémentaire vaut donc :

$$d\Omega = \frac{d\Sigma}{R^2} = \frac{dS \cdot \cos \alpha}{R^2} \quad (\text{A.3})$$

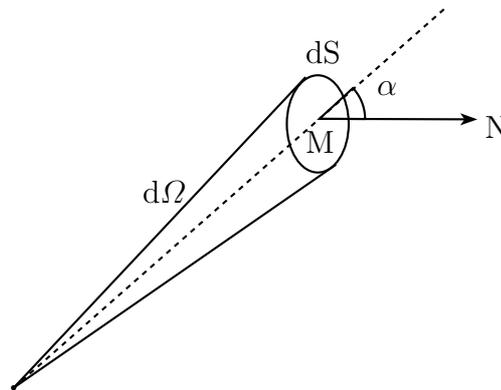


fig. A.2 – Angle solide élémentaire

A.3 Intensités énergétiques

A.3.1 Flux lumineux

Même dans le cadre de la photométrie visuelle où sont évaluées l'intensité d'un rayonnement visible à partir du récepteur oculaire, il est indispensable de définir cette intensité dans un contexte plus général en la reliant aux grandeurs objectives de la physique. Il est naturel de considérer que l'intensité lumineuse est directement liée à l'énergie transportée par le rayonnement. Afin de s'affranchir de la grandeur temps, on mesure plutôt objectivement le rayonnement par l'énergie qu'il transporte pendant l'unité de temps, c'est

à dire sa puissance. On appelle *flux énergétique*, la grandeur désignée par Φ égale à cette puissance. Cette définition s'applique à tous les rayonnements qu'ils appartiennent ou non au domaine visible.

Le flux énergétique émis par une source lumineuse peut se répartir inégalement dans l'espace. Il convient donc de définir d'autres grandeurs permettant de caractériser l'émission d'une source dans l'espace, notamment selon sa direction et son orientation par rapport aux surfaces émettrices et réceptrices.

A.3.2 Intensité d'une source ponctuelle dans une direction donnée

Soit une source lumineuse (dont les dimensions sont suffisamment petites pour pouvoir être considérée comme ponctuelle) placée au point O qui émet dans l'espace environnant.

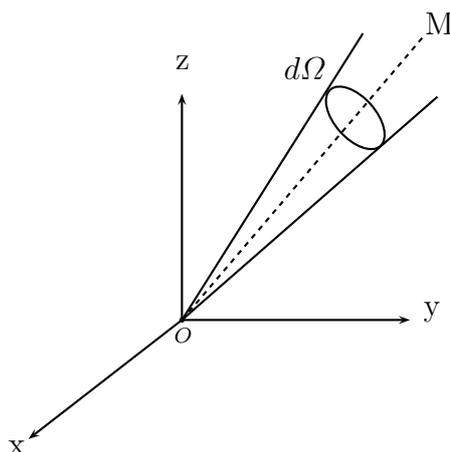


fig. A.3 – Intensité d'une source ponctuelle dans une direction donnée

Il est possible de déterminer le flux lumineux $d\Phi$ émis dans la portion de l'espace délimité par le cône d'angle solide $d\Omega$ autour de la direction OM. On définit l'*intensité énergétique* de la source, dans la direction considérée comme la densité du flux énergétique dans la direction donnée :

$$I_{OM} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{A.4})$$

Elle s'exprime en watts par stéradian (W/sr).

L'intensité d'une source réelle varie en général d'une direction à une autre. La source peut être caractérisée par son *indiatrice d'émission* qui est une surface obtenue en portant dans chaque direction de l'espace une longueur

proportionnelle à l'intensité mesurée. Si l'intensité est la même dans toutes les directions, l'indicatrice d'émission est une sphère et le flux total émis par la source est :

$$\Phi = 4\pi I \tag{A.5}$$

Ce cas idéal n'est jamais réalisé. Dans le cas général, le flux total émis dans tout l'espace par la source se calcule par l'intégrale :

$$\Phi = \int I d\Omega \tag{A.6}$$

A.3.3 Éclairement

Considérons un point M d'une surface réceptrice. Soit $d\Phi$ le flux lumineux reçu par un élément de surface dS élémentaire autour du point M. On appelle *éclairement* au point M, la quantité :

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dS} \tag{A.7}$$

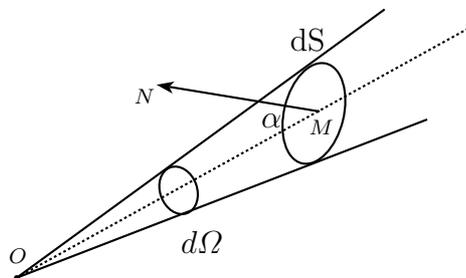


fig. A.4 – Éclairement autour d'un point M

Cette quantité s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2)

Or si I est l'intensité de la source, on a

$$d\Phi = I d\Omega \tag{A.8}$$

où $d\Omega$ est l'angle solide sous lequel la surface dS est vue de la source O :

$$d\Omega = \frac{dS \cos\alpha}{r^2} \tag{A.9}$$

en appelant $r = OM$ la distance entre la source et le point éclairé. On en déduit l'expression de l'éclairement au point M :

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cos \alpha}{r^2} \quad (\text{A.10})$$

On retrouve dans cette relation les deux lois déjà énoncées par Lambert et, pour la première, par Bouguer :

- la *loi des distances* : l'éclairement varie en raison inverse du carré des distances ,
- la *loi de l'obliquité* : l'éclairement varie comme le cosinus de l'angle d'incidence.

De la définition de l'éclairement, on peut déduire que l'éclairement produit en un point par plusieurs sources est la somme ds éclairements produits par chacune des sources émettant isolément. Cela résulte de l'addition des flux lumineux — c'est à dire des puissances — produits par les différentes sources.

A.3.4 Luminance (éclat intrinsèque) pour une source étendue

Nous avons considéré jusqu'à présent des sources de dimensions suffisamment petites pour pouvoir être considérées comme ponctuelles. Une source réelle possède toujours une étendue représentée par une surface. Considérons autour d'un point O d'une source étendue une surface élémentaire dS .

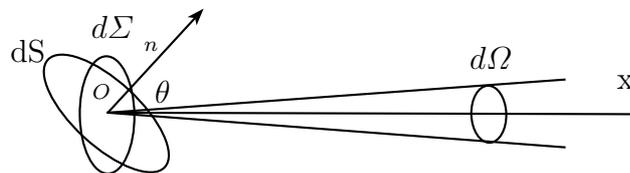


fig. A.5 – Luminance (éclat intrinsèque) en un point d'une source étendue dans une direction donnée

L'émission de la source autour du point O dans une direction donnée Ox peut être représentée par l'intensité de la source dans cette direction rapportée à l'aire élémentaire de la source. Observée dans la direction Ox , tout se passe

comme si la source était diaphragmée par une ouverture d'aire $d\Sigma$ qui est la projection de l'aire lumineuse dS dans un plan normal à la direction dans laquelle est observée la source. $d\Sigma$ est l'aire de la *surface apparente* de dS dans la direction considérée. On définit alors la *luminance* de la source en un point de sa surface, dans une direction Ox , comme l'intensité de la source dans cette direction, ramenée à l'unité de surface apparente.

$$L = \frac{dI}{d\Sigma} = \frac{dI}{dS \cos\theta} \quad (\text{A.11})$$

Si $d^2\Phi$ est le flux énergétique émis par la source dans l'angle solide $d\Omega$, on a :

$$dI = \frac{d^2\Phi}{d\Omega} \quad (\text{A.12})$$

D'où l'on tire :

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Sigma d\Omega} \quad (\text{A.13})$$

Annexe B

Cristaux biréfringents - Double réfraction

B.1 Le spath d'Islande

Le phénomène de la double réfraction est propre à beaucoup de substances cristallines. Il est particulièrement marqué dans le spath d'Islande où il a été signalé par le Danois Rasmus Bartholin (1625-1688) qui a consigné le résultat de ses observations dans les *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici* publiées en 1669.

*L'examen de ce cristal se poursuivant un peu plus loin, un phénomène extraordinaire et insolite est apparu : les objets observés à travers lui à la différence des autres corps transparents, ne présentent pas une image réfractée simple, mais double. Cette expérience tint occupés plus longtemps mes yeux et mon esprit et reléqua les autres, que je décidais de poursuivre en leur temps, car je m'apercevais que j'avais touché à certaines questions fondamentales de Dioptrique concernant la réfraction.*¹

Le spath d'Islande est une variété transparente de *calcite*, c'est à dire de carbonate de calcium (on disait autrefois « carbonate de chaux ») CaCO_3 , le constituant principal des roches calcaires. La maille de cette forme cristalline est représentée par un *rhomboèdre*, c'est à dire un cube *aplatis* mais dont les côtés seraient inégaux. Les arêtes d'un cristal de spath ne sont pas nécessairement égales mais les angles entre les faces réunies au sommet A sont tous les trois égaux à $101^{\circ}53'$. La droite AAo qui fait au sommet A des

1. Pierre Cuvelier, « Les Experimenta crystalli Islandici disdiaclastici d'Erasmus Bartholin » traduction française commentée, 1977, *RHS*, tome 30, n° 3, p. 203.

angles égaux avec les trois faces est un axe de symétrie ternaire (A3).² AAo constitue l'axe du cristal.

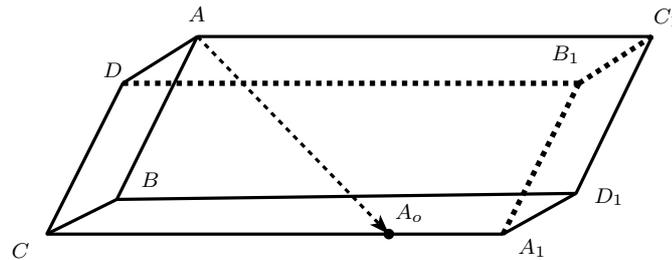


fig. B.1 – Rhomboedre

B.2 Double réfraction

Limité par les deux faces parallèles ABCD et A₁B₁C₁D₁, le cristal, cependant, ne se comporte pas du point de vue optique comme une simple lame à faces parallèles. Si l'on interpose un rhomboèdre de spath entre l'œil et un objet observé à contre-jour, on en voit deux images distinctes, plus ou moins séparées et alignées selon la petite diagonale de la face d'observation. Si la lumière incidente est perpendiculaire à la face d'entrée et que l'on fait effectuer au cristal une révolution dans son plan, l'une des images reste fixe, tandis que l'autre tourne autour d'elle d'une révolution complète. Les deux images présentent la même intensité et la conservent pendant la rotation : le faisceau incident s'est séparé en deux faisceaux d'égale intensité. La pre-

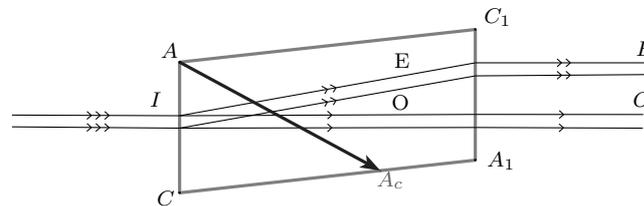


fig. B.2 – Trajet des faisceaux ordinaire et extraordinaire dans le plan de section principale d'un cristal anisotrope, sous incidence normale.

mière image correspond à un faisceau qui traverse le cristal sans être dévié,

2. Une rotation d'un angle de $\frac{2\pi}{3}$ ramène les faces du cristal dans leurs positions primitives.

conformément aux lois de la réfraction ordinaire (lois de Descartes) et qui, pour cette raison, est appelé faisceau *ordinaire*. L'autre image est celle d'un faisceau qui subit un déplacement à la traversée du cristal et n'obéit pas aux lois de Descartes. Aussi est-il nommé faisceau *extraordinaire*. Les deux images observées à travers le cristal ne paraissent pas situées dans le même plan. La plus rapprochée correspond au faisceau ordinaire et à un indice de réfraction n_o , la plus éloignée correspond au faisceau extraordinaire et à un indice de réfraction n_e et l'on a $n_o > n_e$. La biréfringence est liée à l'anisotropie de la structure cristalline. Comme l'explique Claude Pouillet dans son cours destiné à « l'enseignement de la physique dans les établissements de l'Université »³ :

Dans un cristal doué de la double réfraction, il y a toujours une ou deux directions suivant lesquelles un rayon de lumière ne se divise jamais. Ces directions remarquables sont ce que l'on nomme les axes optiques du cristal, ou simplement les axes ; elles ont toujours une certaine symétrie par rapport aux faces naturelles de la forme cristalline.

Les cristaux dans l'intérieur desquels il n'y a qu'une direction d'indivisibilité se nomment cristaux à un axe.

Les cristaux dans l'intérieur desquels il y a deux directions d'indivisibilité se nomment cristaux à deux axes.

*Il ne paraît pas qu'il puisse exister des cristaux réguliers ayant plus de deux axes.*⁴

Cela posé, on définit une *section principale* dans les cristaux uniaxes comme le plan mené par l'axe optique (ou parallèle à ce dernier) et perpendiculaire à une face du cristal. À chaque point d'incidence sur cette face correspond un tel plan et tous ces plans parallèles correspondent à la même section principale. Pouillet ajoute que « la section principale appartient plutôt à une face qu'au cristal entier, car chaque face a la sienne. »⁵ Le cristal de calcite est un cristal uniaxe : l'axe optique AAo se confond avec l'axe de symétrie ternaire. « La section principale coupe les faces naturelles suivant une ligne parallèle à la diagonale menée par les angles obtus du parallélogramme et divisant celui-ci en deux parties égales. »⁶ Le phénomène de biréfringence est marqué pour le cristal de calcite en raison de la différence des deux indices n_e (1,486)

3. exprimées en 1847, ces notions ont toujours cours aujourd'hui dans l'enseignement d'*optique cristalline* pratiqué à l'université.

4. C. Pouillet, *Éléments de physique expérimentale et de météorologie, cinquième édition*, Paris, Bechet jeune, 1847, tome 2, p. 351.

5. C. Pouillet, *ibid.* p. 353-354.

6. F. Arago, *Œuvres*, tome 7, p. 296.

et n_o (1,658), ce qui conduit à une déviation de 6° à l'intérieur du cristal pour le faisceau extraordinaire, déviation dont les effets sont perceptibles à l'œil nu. Mais ces circonstances sont exceptionnelles et le phénomène n'est pas souvent appréciable. Les cristaux isotropes (système cubique) comme le chlorure de sodium ne montrent pas de biréfringence. Notons enfin que les cristaux comme la calcite, très biréfringents pour certaines directions, ne le sont pas pour d'autres.

B.3 L'expérience *miraculeuse* de Huygens

Comme l'indiquent Jamin (Jules Jamin, 1818-1886) et Bouty (Edmond Bouty, 1846-1922)⁷, le phénomène de double réfraction soulève deux questions : 1° les rayons ordinaires et extraordinaires possèdent-ils les mêmes propriétés physiques que la lumière naturelle du faisceau incident ? 2° À quelles lois obéit la propagation de la lumière dans le cristal ? En 1690, une vingtaine d'années après la publication des observations de Bartholin, Christian Huygens publia en français, à Leyde, son *traité de la lumière*. Le chapitre VI de l'ouvrage est entièrement consacré à *l'étrange réfraction du cristal d'Islande*. Selon Huygens, la lumière issue d'une source lumineuse se propage grâce aux vibrations d'un milieu particulièrement élastique qui imprègne tout l'espace et qu'il appelle *l'éther*. Dans les cristaux *ordinaires* — il faut comprendre isotropes —, les *ondelettes* émises en chaque point atteint par le front de l'onde enveloppe sont des sphères. Pour expliquer les deux réfractions différentes dans le cristal de spath, Huygens imagine deux *émanations d'ondes* : il suppose des ondes de forme sphérique pour la réfraction ordinaire ; quant à l'émanation qui doit produire la réfraction extraordinaire, il l'imagine formée d'ondes elliptiques, *ou pour mieux dire sphéroïdes*. Il comprend alors *ce qui lui avait paru fort difficile* qu'un rayon de lumière sous incidence normale peut subir une réfraction (extraordinaire) tandis que l'onde continue à s'étendre parallèle à la surface, « de sorte qu'ici la lumière ne s'étend pas par des lignes perpendiculaires à ses ondes, comme dans la réfraction ordinaire, mais ces lignes coupent les ondes obliquement. » Les rayons lumineux ne sont donc pas orthogonaux aux surfaces d'onde, comme c'est le cas lorsque la lumière se propage dans un milieu isotrope⁸. Sa parfaite maîtrise de la géométrie lui permet ensuite de démontrer les lois de toutes les réfractions dans le cristal de spath, lois qu'il vérifie par les mesures exactes de ces réfractions. Comme le souligne Olivier Darrigol, l'établissement des lois de la réfraction dans le

7. J. Jamin, E. Bouty, *Cours de physique de l'École polytechnique*, Paris, Gauthier-Villars, 1881, tome 3, fasc. 3, p. 311.

8. C. Huygens, *Traité de la lumière*, Paris, Gauthier-Villars, 1920, pp. 77-78.

spath d'Islande constitue sans doute « la plus grande réussite de Huygens en optique »⁹.

Le savant hollandais conclut le chapitre par le *phénomène merveilleux* qu'il observe après avoir eu l'idée de laisser un faisceau de lumière naturelle traverser deux cristaux de spath appliqués l'un sur l'autre. Ces observations tiennent en trois points : 1°) Si les cristaux sont tenus de telle sorte que la section principale de l'un reste parallèle à celle de l'autre, les deux faisceaux ordinaire et extraordinaire pénétrant dans le second cristal ne se dédoublent plus : le faisceau ordinaire donne naissance à un faisceau ordinaire dans le second cristal et de même le faisceau extraordinaire. 2°) Si désormais, les cristaux sont disposés de telle sorte que les sections principales se coupent à angle droit, « le rayon qui est venu de la réfraction ordinaire ne fait plus qu'une réfraction irrégulière dans le morceau inférieur, et au contraire le rayon qui est venu de la réfraction irrégulière, ne fait plus qu'une réfraction régulière. » 3°) Dans les autres positions, les faisceaux ordinaire et extraordinaire, émergeant du premier rhomboïde, se partagent derechef en deux par la réfraction dans le second cristal, « de sorte que du seul rayon AB [le rayon incident] il s'en fait quatre, tantôt d'égale clarté, tantôt de bien moindre les uns que les autres, selon la diverse rencontre des positions des cristaux, mais qui ne paraissent pas avoir plus de lumière tous ensemble que le seul rayon AB. » Huygens avoue son impuissance à apporter une explication du phénomène :

*il semble qu'on est obligé de conclure que les ondes de lumière, pour avoir passé le premier cristal, acquièrent certaine forme ou disposition, par laquelle en rencontrant le tissu du second cristal, dans certaine position, elles puissent émouvoir les deux différentes matières qui servent aux deux espèces de réfractions ; et en rencontrant ce second cristal dans une autre position, elles ne puissent émouvoir que l'une de ces matières. Mais pour dire comment cela se fait, je n'ai rien trouvé jusqu'ici qui me satisfasse.*¹⁰

Le savant hollandais apporte à la seconde question soulevée par la réfraction des rayons dans le spath d'Islande une réponse claire, nette et précise, mais il ne peut expliquer les modifications physiques subies par la lumière naturelle, dans le cristal de spath. Néanmoins, apparaît dans sa conclusion l'idée d'une structuration des ondes lumineuses, par la traversée du premier rhomboïde, *forme ou disposition* qu'elles conservent à la sortie du cristal. L'appel à deux *différentes matières* au sein du cristal de spath pour expliquer

9. Olivier Darrigol, *A History of Optics, from Greek Antiquity to the Nineteenth Century*, Oxford University Press, 2012, p. 70.

10. Christian Huygens, *Traité de la lumière*, traduction française, Gauthier-Villars, 1920, p. 112.

les deux *espèces de réfractions* montre bien, malheureusement, l'embarras de Huygens.

B.4 Micromètre à double image

Comme le remarque James Lequeux, « sans comprendre ces propriétés [celles du spath et des cristaux biréfringents], on les utilisait dans des buts pratiques »¹¹. Ainsi Daguin (Pierre Adolphe Daguin, 1814-1884) signale « l'heureuse application que Rochon a fait de la division de la lumière par un cristal biréfringent à la mesure précise des petits angles. »¹². L'instrument appelé *micromètre à double image* mesure les diamètres apparents des objets éloignés, et par voie de conséquence leur distance. Cela s'applique autant à la distance nautique des vaisseaux en mer qu'à l'astronomie et à la mesure des corps célestes. L'histoire de cette invention à la portée stratégique et celle de son inventeur l'abbé Rochon ont été renseignées par Danielle Fauque¹³. Le but de cette note est seulement d'apporter les éléments théoriques, nécessaires à la compréhension de l'instrument. Rochon utilise deux prismes à angle droit accolés par leur hypoténuse avec du *mastic en larmes*¹⁴. Les deux prismes sont taillés dans un même cristal uniaxe (cristal de roche) de telle sorte que l'axe du premier soit perpendiculaire à la face d'entrée AB et l'axe du second parallèle à l'arête (perpendiculaire au plan de la figure). Les indices de réfraction sont respectivement pour la silice : $N_o = 1.548$, $N_e = 1.557$; pour le mastic en larmes : $n = 1.54$. Pour le quartz, la biréfringence $N_e - N_o = 0.009 > 0$. Le cristal de roche est un uniaxe positif.

Si un faisceau de lumière naturelle arrive sous incidence normale par la face AB, il poursuit sa route, en ligne droite, sans être dévié ni dédoublé. En effet, le faisceau ordinaire suit son parcours défini par les lois de Descartes dans le milieu d'indice N_o . La surface d'onde est une sphère dont la trace dans le plan d'incidence (plan de la figure) est représenté par un cercle de rayon $\frac{1}{N_o}$. Quant au faisceau extraordinaire, son parcours dans le milieu correspond à un indice $N_o \leq n_e \leq N_e$ dont la valeur dépend de sa direction. Comme ce parcours est parallèle à l'axe optique, $n_e = N_o$ ¹⁵. La surface d'onde est

11. Lequeux, *François Arago, un savant généreux. Physique et astronomie au XIX^e siècle*, Paris, Les Ulis, EDP Sciences, Observatoire de Paris, 2008, p. 95.

12. P. A. Daguin, *Traité élémentaire de physique théorique et expérimentale*, deuxième édition, tome quatrième, Toulouse, Édouard Privat, Paris, Dezobry, Tandou, 1862, 481.

13. Danielle Fauque, « Alexis-Marie Rochon, savant astronome et opticien (1741-1817) », *RHS*, 1985, tome 38, n° 1, p. 3-36.

14. Ce produit utilisé par plusieurs corps de métiers (joailliers, opticiens) de l'époque s'obtient par dissolution dans l'essence de térébenthine d'une gomme issue de l'arbre à mastic ou *pistachier lentisque* et provenant de l'île de Chios en Grèce.

15. On aurait $n_e = N_e$, si la lumière se propageait perpendiculairement à l'axe.

un ellipsoïde de révolution dont la trace dans le plan est une ellipse venant tangenter le cercle ordinaire dans la direction de l'axe optique. Rayons ordinaire et extraordinaire sont donc confondus pendant la traversée du premier prisme. Parvenu au point J, le faisceau se divise en deux : le rayon ordinaire

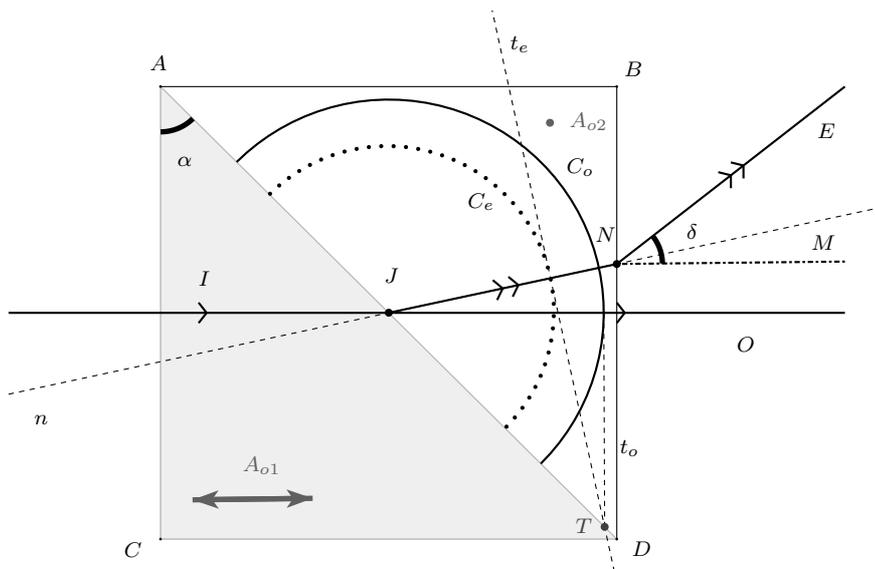


fig. B.3 – Biprisme de Rochon.
Trajet des faisceaux ordinaire et extraordinaire, sous incidence normale.

continue sa route en ligne droite dans un milieu de même indice N_o que celui du premier prisme. Parvenu, sous incidence normale, au dioptre formé par la face de sortie BD du prisme, il sort sans être dévié. L'axe optique étant cette fois perpendiculaire à la direction de propagation, le rayon extraordinaire se réfracte selon les lois de Descartes en voyant un indice N_e , quel que soit l'angle d'incidence. La direction du rayon réfracté s'obtient par la construction d'Huyghens. Les deux cercles C_o et C_e , de rayons respectifs $\frac{1}{N_o}$ et $\frac{1}{N_e}$ correspondent aux traces des surfaces d'onde ordinaire et extraordinaire. La trace des plans enveloppant les ondes ordinaire et extraordinaire coupe la ligne de séparation du dioptre au point T. On en déduit le rayon extraordinaire JN dont la direction est orthogonale au plan t . Quand il atteint la face de sortie BD du prisme, il se réfracte en s'écartant de la normale. L'angle ENM , noté δ entre les directions du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire est appelé l'angle de duplication. L'application de la loi des sinus de Descartes permet d'obtenir facilement l'expression de δ en fonction de l'angle CAD , noté α , du prisme et des indices ordinaire et extraordinaire :

$$\delta = (N_o - N_e)\tan(\alpha)$$

La différence entre N_o et N_e étant petite pour le cristal de roche, l'angle de duplication reste très petit. Daguin annonce : $\delta = 19'30''$ pour $\alpha = 30^\circ$ ¹⁶. Mascart ajoute que l'angle $\delta \ll$ qui mesure la distance angulaire des deux rayons émergents est à peu près indépendant de la couleur et ne varie pas d'une manière appréciable quand la direction de la lumière primitive s'écarte de petites quantités à droite ou à gauche de la normale(...) à la face d'entrée. La vision d'un objet au travers du prisme fournira donc deux images très voisines et à peu près achromatiques. »¹⁷

B.4.1 La lunette de Rochon

Le biprisme de Rochon peut être placé à l'intérieur d'une lunette d'approche : une vis et une crémaillère assurent le déplacement du prisme le long de l'axe de la lunette.

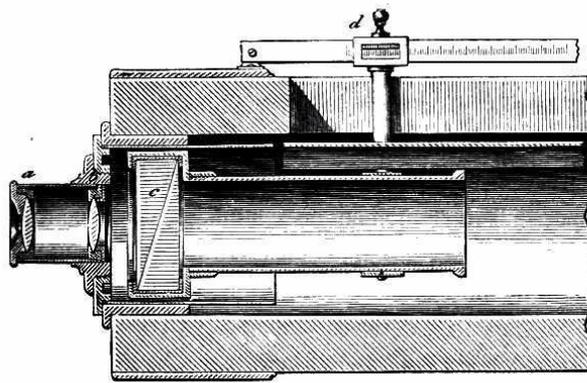


fig. B.4 – Micromètre de Rochon.

On distingue de gauche à droite l'oculaire a , le double prisme c , la crémaillère et la règle graduée d mesurant le déplacement du prisme par rapport au plan focal de l'objectif.

Tiré de Arago, *Astronomie populaire*, tome 2, Paris, Théodore Morgand, 1865, p. 61.

Si le prisme est placé entre l'objectif Ob et le plan focal de telle sorte que sa face AC soit perpendiculaire à l'axe optique de la lunette, à l'aide de l'oculaire Oc , on peut observer dans le plan focal de l'objectif deux images d'un objet éloigné. Lorsque l'instrument n'est pas réglé, l'image extraordinaire $A_E B_E$ est séparée de l'image ordinaire $A_O B_O$ et ce d'autant plus que le prisme se rapproche de l'objectif puisque l'angle de duplication δ ne dépend que de la construction du prisme et reste constant.

Pour la mesure du diamètre apparent d'un objet, on fait en sorte, en dé-

16. P. A. Daguin, *ibid.*, 482.

17. É. Mascart, *Traité d'optique, Tome premier*, Paris, Gauthier-Villars, p. 621-622.

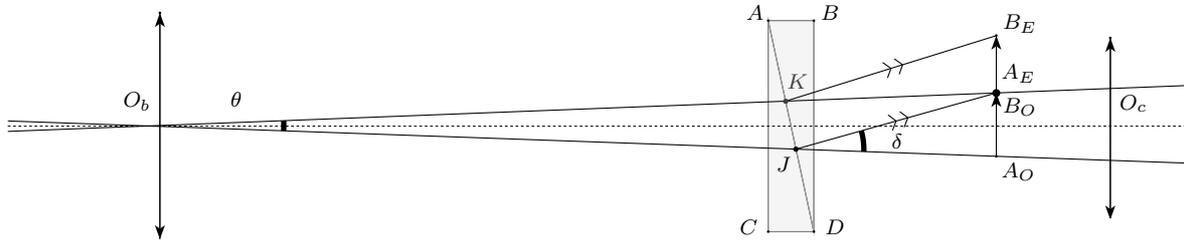


fig. B.5 – Lunette de Rochon.

Création de la double image d'un objet éloigné. Les deux images sont ici amenées au contact. Pour la lisibilité du schéma, les angles représentés sont plus grands que ceux d'une observation réelle.

plaçant le prisme avec la vis de réglage, d'amener les deux images en contact. En appelant h la hauteur de chacune des images ordinaire ou extraordinaire (en raison de la petitesse des angles, on peut considérer que les deux images ont même hauteur), d la distance entre le prisme et le foyer principal image de l'objectif, F la distance focale, on trouve :

$$\text{tang}(\delta) = \frac{h}{d}$$

et

$$\text{tang}(\theta) = \frac{h}{F}$$

On en tire immédiatement la tangente du diamètre apparent de l'objet observé :

$$\text{tang}(\theta) = d \cdot \frac{\text{tang}(\delta)}{F}$$

Comme

$$\frac{\text{tang}(\delta)}{F}$$

est une constante calculable à partir de valeurs connues, on a directement le diamètre apparent de l'objet visé :

$$\text{tang}(\theta) = \frac{H}{D} = k \cdot d$$

d'où l'on déduit sa hauteur absolue H si l'on connaît sa distance D à l'objectif ou, inversement la distance si l'on connaît la hauteur. C'est sans doute pourquoi Rochon fournit dans son mémoire, les hauteurs de mâture des vaisseaux des *armées navales*, « parce qu'elles peuvent servir à fixer la position

absolue des vaisseaux, par rapport à celle du vaisseau amiral. »¹⁸ Rochon signale que la mesure suppose la connaissance préalable et précise de l'angle de la double réfraction, c'est à dire de l'angle δ :

*(...) connaissant par expérience l'angle de la double réfraction, la distance focale de l'objectif, et enfin l'intervalle qui sépare le milieu réfringent du foyer, on aura par une simple proportion le diamètre de l'objet. Ainsi la double réfraction étant de 20 minutes, la distance focale de 4 mètres, et l'intervalle entre le milieu doublement réfringent et le foyer d'un décimètre. Si les deux images sont en ce cas en contact parfait, le diamètre de l'objet sera de 30 secondes. On doit voir que la précision de cette mesure dépend primitivement du degré d'exactitude que l'on a mis dans la détermination de la double réfraction.(...) dans la dernière construction dont je viens de parler, une seconde d'erreur dans cette détermination, ne donne dans ce cas qu'une inexactitude de deux tierces.*¹⁹

Danielle Fauque donne une évaluation de la précision de l'instrument : $2,4 \cdot 10^{-3}$, soit une incertitude absolue proche de $3''$ pour un diamètre apparent $\theta = 20'$ ²⁰. Cette valeur rend bien compte du degré de perfection atteint par le micromètre que Rochon n'a cessé de perfectionner. Néanmoins les succès de l'appareil semblent inégaux. Si, *pour les usages de la guerre* on peut déterminer facilement avec l'appareil la distance d'une troupe en connaissant la taille moyenne d'un fantassin, son usage en astronomie s'avère plus délicat. Biot écrit :

*Toutefois, ces résultats sont d'autant plus sujets à l'erreur, que la distance est plus grande, et l'objet moindre; de sorte qu'il ne faudrait pas songer, par exemple, à s'en servir pour déterminer la distance des astres, quoique cela ait été quelquefois proposé. Leur diamètre apparent est le seul élément astronomique qu'il faille en déduire.*²¹

Dans son traité sur l'instrumentation scientifique, Brewster (David Brewster, 1781-1868) reproche au micromètre du Breton une étendue de ses mesures, limitée à des angles ne dépassant pas $20'$, voire $40'$ pour les instruments les mieux construits²². Quant à Arago, il signale que si Rochon et Méchain

18. Alexis Rochon, « Mémoire sur les verres achromatiques Adaptés à la mesure des angles, et sur les avantages que l'on peut retirer de la double réfraction pour la mesure précise des petits angles », *Journal de physique, de chimie et d'histoire naturelle*, tome 53, thermidor an 9 (juillet-août 1800), p. 194-195.

19. Alexis Rochon, *ibid.*, p.192.

20. Danielle Fauque, *ibid.*, p. 34-35

21. J. B. Biot, *Précis élémentaire de physique expérimentale*, seconde édition, Paris, Deterville, 1821, tome 2, p. 280.

22. D. Brewster, *A Treatise on new philosophical instruments for various purposes in*

(Pierre François André Méchain, 1744-1804) ont utilisé avec succès le micromètre à double image à la mesure de Mars, de Jupiter et de Saturne, l'instrument a été abandonné depuis lors par la plupart des astronomes²³. Verdet (Émile Verdet, 1824-1866) fournit une explication à cet abandon : les franges irisées qui bordent l'image extraordinaire et empêchent ainsi d'évaluer précisément le contact des deux images²⁴. On ne saurait clore cependant cette digression sans évoquer l'inattendu retour en grâce du micromètre à double image, plus d'un siècle après la réflexion d'Arago, auprès de plusieurs astronomes français reconnus. Bernard Lyot(1897-1952), Henri Camichel(1907-2003), Paul Muller(1910-2000)²⁵ ont offert, avec l'observation et le catalogage des étoiles doubles, une nouvelle carrière à ce bel instrument.²⁶

the arts and sciences, London, John Murray, Edinburgh, William Blackwood, 1813, p. 187-189.

23. F. Arago, *Astronomie populaire*, tome 2, deuxième édition, Paris, Librairie des sciences naturelles, Théodore Morgand, 1865, p. 61.

24. É. Verdet, *Cours de physique professé à l'École polytechnique*, tome 2, Paris, Imprimerie impériale, 1869, p. 396.

25. P. Muller, « Description et mode d'emploi d'un nouveau micromètre astronomique », *Revue d'Optique théorique et instrumentale*, 1939, tome 18, p. 172-176.

26. Lire, à ce sujet, Paul Couteau(1923-2014), *L'observation des étoiles doubles visuelles*, 1978, Paris, Flammarion, p. 41-43.

Annexe C

Polarisation de la lumière

C.1 Pôles

Il est commode de présenter la *polarisation* de la lumière comme la rupture de la symétrie de révolution que présente un faisceau de lumière naturelle autour de son axe. Cette rupture est provoquée par les divers accidents que peut rencontrer la lumière sur son trajet : réflexion et réfraction à la rencontre des milieux *diaphanes* (transparents) voire réflexion sur certains corps opaques¹. Cela amène à distinguer, comme le signale Jean Rosmorduc² : 1) la *lumière naturelle*, « lumière qui vient directement de la source sans avoir été ni réfléchi ni réfractée ». Son rayon possède, mais seulement de façon statistique pour des durées pas trop petites, la symétrie du cylindre circulaire fixe. 2) la *lumière polarisée* dont, suivant la nature même de la polarisation, le rayon a d'autres symétries que la précédente.

L'idée d'une modification de la structure du rayon lumineux, lors de la traversée de certains milieux diaphanes semble émerger de l'étude du phénomène de la biréfringence par Huyghens (voir annexe B), puis par Newton. Ce dernier semble le premier à utiliser, dans le livre III de son *Optique* le mot *pôle*³ pour représenter cette disposition concernant autant le rayon lumineux que le milieu qu'il traverse :

il s'ensuit delà , que dans ces côtés des Rayons il y a aussi une vertu ou

1. E.L. Malus, « Sur une propriété de la lumière réfléchi », *Mémoires de physique et de chimie de la Société d'Arcueil*, tome 2, 1809, p. 157.

2. J. Rosmorduc, « L'idée d'une structure de la lumière dans l'histoire de la physique : des origines à Fresnel », *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, Centre de documentation Sciences humaines, CNRS, 1977, n°2, p.3.

3. Sur ce terme, lire Jean Rosmorduc, « Les tribulations d'un terme scientifique : « pôle » ... « polarisation », de la cosmologie de Platon à l'optique du XIXe siècle », *Revue d'histoire des sciences*, tome 29, n°1, 1976. pp. 51-62.

*disposition qui correspond à cette disposition du Crystal, ainsi que les Poles de deux Aimants correspondent l'un à l'autre.*⁴

Mais plus loin, l'auteur des *Principia*, comme s'il regrettait l'emploi d'un mot trop fort, s'empresse d'ajouter :

*Je ne dis pas que cette dernière vertu soit magnétique. Il semble qu'elle soit d'une autre espèce*⁵.

Le Livre III de l'Optique de Newton est divisé en trente et une « Questions qui servent de Conclusion à tout l'Ouvrage. »⁶ Newton y rappelle l'analogie entre l'action à distance que les corps transparents exercent sur les rayons de lumière et l'attraction réciproque des corps. Newton ne précise pas la nature des rayons, matérielle ou non⁷, mais il interroge s'ils ne sont pas « de fort petits Corpuscules élançés ou poussés hors des Corps lumineux ». De différentes *grosseurs*, les rayons sont plus ou moins réfrangibles et, partant, cette grosseur détermine la couleur qu'ils produisent : les plus petits produisent le *Violet, la plus faible & la plus sombre de toutes les couleurs*, les plus gros les couleurs les plus fortes et les plus éclatantes, le bleu, le vert, le jaune et le rouge. La question XXV interroge le lecteur sur la pertinence d'attribuer aux rayons lumineux d'autres *propriétés originaires* que celles dont ont déjà été données les descriptions. Newton se confronte alors à la biréfringence observée sur le *Crystal d'Islande*. Il remarque, comme Huygens l'a fait avant lui, que si la lumière traverse successivement deux cristaux de spath dont les faces sont parallèles, les rayons qui sont rompus de la manière *ordinaire* (respectivement *extraordinaire*) dans la première surface du premier cristal, seront rompus de la manière *ordinaire* (respectivement *extraordinaire*) dans toutes les surfaces suivantes. La même chose arrive encore, si les faces des deux cristaux sont inclinées les une par rapport aux autres, pourvu que leurs *plans à Refraction perpendiculaire* (plans de section principale) soient parallèles entre eux. L'explication de Newton fait intervenir une propriété nouvelle :

Il y a donc dans les Rayons de Lumière une différence originaires, en vertu de laquelle quelques Rayons sont dans cette Expérience constamment rompus de la manière ordinaire, & d'autres constamment rompus de la ma-

4. Isaac Newton, *Traité d'optique sur les réflexions, réfractions, inflexions, et les couleurs, de la lumière.*, traduction de Coste, seconde édition, 1722, p.550.

5. Newton, *ibid.*, p.550.

6. Newton, *ibid.* p. 503.

7. Newton, *Principes mathématiques de la Philosophie naturelle*, tome 1, traduction du latin par Madame la marquise du Chastelet, d'après l'édition de 1726, Paris, 1759, p.240.

*niere extraordinaire. (...)La Refraction extraordinaire est donc produite par une propriété naturelle aux Rayons.*⁸

Mais il faut encore expliquer que les rayons réfractés de manière extraordinaire, à la traversée d'un premier cristal de spath se réfractent de façon ordinaire à la traversée d'un second cristal, lorsque les plans à *réfraction perpendiculaire* des deux cristaux sont à angles droits. Ce qui oblige à admettre qu'un rayon lumineux, sorti d'un premier cristal de spath ne possède plus les mêmes propriétés *dans tous les azimuts*. C'est l'objet de la question XXVI à laquelle Newton répond en définissant une structure spatiale au rayon lumineux qui se trouve doté de quatre côtés *doüés de différentes propriétés originaires* :

*deux desquels opposés l'un à l'autre, inclinent le Rayon à être rompu de la maniere extraordinaire toutes les fois que l'un ou l'autre est tourné vers la Plage de la Refraction extraordinaire; & les deux autres ne l'inclinent point à être autrement rompu que de la maniere ordinaire, quoique tournés l'un ou l'autre vers la Plage de la Refraction extraordinaire. On peut donc appeller les deux premiers, les côtés à Refraction extraordinaire; & les deux autres, les côtés à refraction ordinaire. (...)Chaque rayon de lumière a donc deux côtés opposés, doüés originairement d'une propriété d'où dépend le Refraction extraordinaire, & deux autres côtés opposés qui n'ont pas cette propriété.*⁹

Quant à la nature de ces *propriétés originaires*, elles sont définies par Newton comme des *vertus* ou *dispositions attractives* qui se manifestent dès que les côtés du rayon sont tournés vers la *plage à réfraction extraordinaire*. Il s'agit donc d'une interaction mutuelle entre telle *plage* du cristal et tel côté du rayon, à l'instar de l'interaction magnétique entre les pôles d'un aimant.

Dans l'optique newtonienne, les rayons lumineux sont donc doués de différentes *propriétés originaires* que l'on peut comprendre comme des caractères initiaux, conférés par la source de lumière. Pour Newton, en conséquence, la symétrie de révolution du rayon de lumière naturelle ne saurait être une propriété à priori de ce rayon. Et c'est la traversée du cristal d'Islande qui fait office de révélateur de l'orientation initiale des rayons, mais en aucun cas elle n'en est la cause. La conclusion du livre III conforte ainsi l'idée d'une lumière, « agrégat de propriétés *péripatétiques* variées », selon l'expression de Marco Pranza¹⁰, la nécessité de chacune de ces propriétés se faisant sentir à chaque phénomène nouveau, touchant aux rayons de lumière.

8. Newton, *ibid.*, p. 529-530.

9. Newton, *ibid.*, p. 532-533.

10. Marco Pranza, *Newton*, Paris, 2002, Les belles lettres, p.15.

C.2 Étienne Louis Malus et la loi du *cosinus carré*

Il est surprenant, rappelle l'Abbé Moigno (François Napoléon Marie Moigno, 1804-1884), que le *phénomène merveilleux* observé à la traversée du spath d'Islande soit resté pendant plus de cent ans *un fait isolé dans la science*¹¹ ; un siècle pendant lequel la question de la *structuration* du rayon lumineux par la traversée de certains milieux diaphanes ne sembla guère stimuler l'intérêt des physiciens alors que l'optique instrumentale faisait en même temps d'incroyables progrès¹². En 1808, la Première classe de l'Institut proposa un prix de mathématique au mémoire qui apporterait *une théorie mathématique vérifiée par l'expérience* de la double réfraction de la lumière. C'est le mémoire d'un jeune inconnu, Étienne-Louis Malus, qui fut couronné. L'élève de Gaspard Monge, sorti de l'École du génie de Mézières a mis à profit sa profonde connaissance de la géométrie tant analytique que descriptive et il a déjà échafaudé une théorie analytique de l'optique géométrique, présentée en première partie de son mémoire. Rompu à l'utilisation des instruments de mesure (en particulier des angles avec le cercle répétiteur de Borda), Malus peut aussi mener une étude expérimentale complète de la réfraction dans le spath d'Islande et livrer des résultats qui vérifient les lois de Huygens avec une remarquable précision. Mais il ne s'en tient pas à cette démonstration : au chapitre troisième du mémoire, le jeune officier du génie traite *Des nouvelles propriétés physiques que la lumière acquiert par l'influence des corps qui la réfractent ou la réfléchissent*. Il y expose ses recherches sur la double réfraction, reprises exactement là où Huygens les avait arrêtées. Il reproduit l'*expérience merveilleuse* du Hollandais avec deux rhomboèdres de spath d'Islande mais aussi sur d'autres substances cristallisées qui doublent les images. Il constate comme Huygens que si les sections principales des deux cristaux sont parallèles, le faisceau issu de la réfraction ordinaire dans le premier cristal ne se dédouble pas dans le second cristal où il subit une réfraction ordinaire. De même, le faisceau extraordinaire émergent du premier cristal subit une seule réfraction extraordinaire dans le second. Mais si l'on fait tourner le second rhomboèdre sans changer l'orientation de la face d'incidence, les deux faisceaux ordinaire et extraordinaire issus du premier cristal se dédoublent, en sorte qu'une partie du faisceau ordinaire (respectivement extraordinaire) commence à se réfracter de façon extraordinaire (respectivement ordinaire). Après un quart de tour, le faisceau ordinaire (respectivement extraordinaire)

11. Moigno, *Répertoire d'optique moderne* première partie, Paris, Leipsig, 1847, p.101.

12. Sur l'optique au XVIII^e siècle, lire les remarques de Vasco Ronchi, dans son *Histoire de la lumière*, Paris, Armand Colin, 1956, pp. 215-232.

émergeant du premier cristal est réfracté totalement de manière extraordinaire (respectivement ordinaire). Malus constate que la lumière directe se distingue de la lumière émergeant du cristal par le fait que la première conserve la faculté d'être divisée en deux faisceaux tandis que pour la seconde, cette faculté dépend de l'angle entre le plan d'incidence et la section principale. La conclusion s'impose : la traversée des substances cristallines, telles que le spath d'Islande modifie l'état du rayon lumineux et lui fait perdre sa symétrie de révolution. Et Malus rappelle que cette nouvelle propriété permanente acquise par la lumière est observable à partir de cristaux différents, carbonate de plomb et sulfate de baryte par exemple. Il en tire la conclusion que « la modification que la lumière reçoit de ces différents corps est parfaitement identique. »¹³ et il peut annoncer :

*Il y a cependant des circonstances où l'influence de certains corps imprime aux rayons qu'ils réfléchissent, ou qu'ils réfractent, des caractères ou des propriétés qu'ils transportent avec eux, et qui les distinguent essentiellement de la lumière directe.*¹⁴

Dans leur cours de l'École polytechnique, Jamin et Bouty expriment de façon parlante le phénomène observé par Malus, en représentant les intensités des images fournies par le seul faisceau ordinaire à la traversée du second cristal de spath, en fonction de l'angle α entre les sections principales des deux cristaux. En appelant I l'intensité du faisceau de lumière naturelle incident, à la sortie du premier cristal, les intensités des deux faisceaux ordinaire et extraordinaire sont égales et l'on a :

$$O = E = \frac{I}{2}$$

1) Si $\alpha = 0^\circ$ et si $\alpha = 180^\circ$, les sections principales des deux rhomboïdes sont confondues, le faisceau ordinaire ne se dédouble pas dans le second cristal et l'intensité de l'image ordinaire est à son maximum $OO' = O = \frac{I}{2}$, celle de l'image extraordinaire est nulle : $OE' = 0$.

2) Si $\alpha = 45^\circ$, le faisceau ordinaire se dédouble et les deux images ordinaire et extraordinaire ont la même intensité. Si on les superpose : $OO' + OE' = O = \frac{I}{2}$

3) Si $\alpha = 90^\circ$ et si $\alpha = 270^\circ$, les sections principales des deux rhomboïdes sont à angle droit, le faisceau ordinaire donne une image extraordinaire dont l'intensité est à son maximum : $OE' = O$, tandis que l'intensité de l'image ordinaire est nulle : $OO' = 0$.

13. E. L. Malus, « Sur une propriété de la lumière réfléchie », *Mémoires de physique et de chimie de la Société d'Arcueil*, t. 2, 1809, 146-147.

14. Malus, *ibid.* p.143.

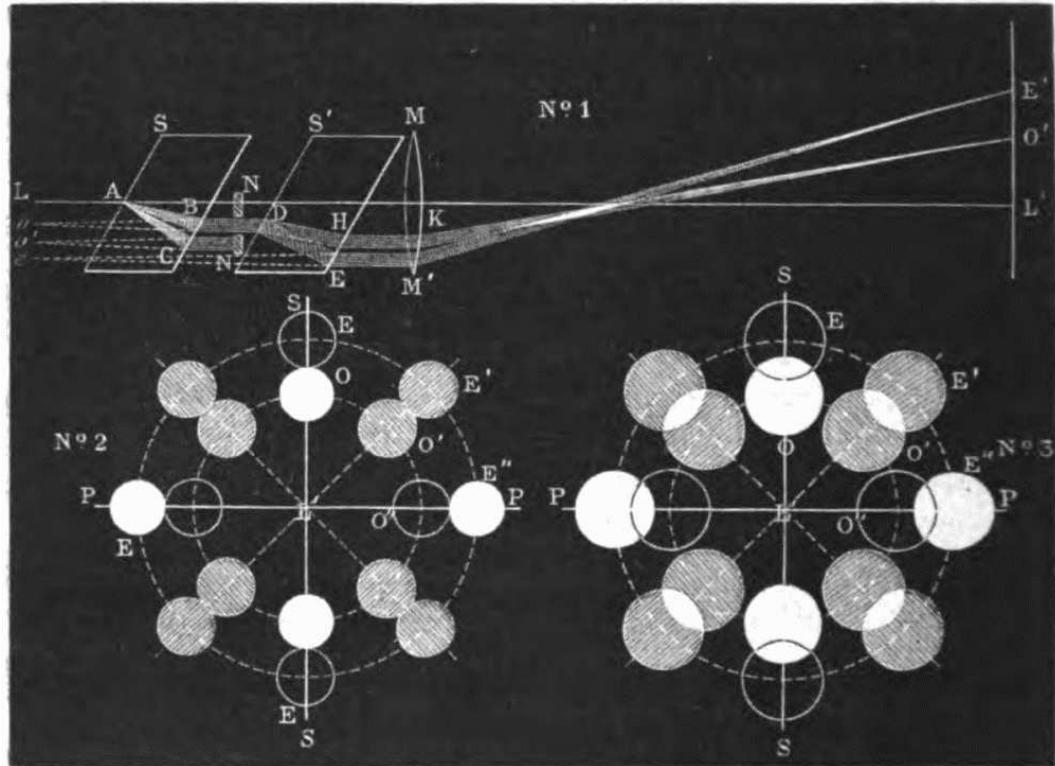


fig. C.1 – Expérience des deux rhomboïdes.
 Seul le trajet du faisceau ordinaire émergeant du premier cristal est examiné.
 Tiré de Jamin, *Cours de physique de l'École polytechnique*, tome 3, fasc. 3, Paris, Gauthier-Villars, 1881, p. 312.

4) Enfin, quand la section principale du second rhomboïde occupe deux positions symétriques par rapport au plan SS parallèle à la section principale du premier cristal, et par rapport au plan PP perpendiculaire à cette section principale, les images ordinaire et extraordinaire conservent la même intensité.

Si l'on examine maintenant la réfraction du faisceau extraordinaire émergeant du premier cristal, on observe, à la sortie du second cristal, les intensités suivantes :

- 1) Si $\alpha = 0^\circ$ et si $\alpha = 180^\circ$, l'intensité de l'image extraordinaire est à son maximum $EE' = E = \frac{I}{2}$, celle de l'image ordinaire est nulle : $EO' = 0$.
- 2) Si $\alpha = 45^\circ$, le faisceau extraordinaire se dédouble et les deux images ordinaire et extraordinaire ont la même intensité. Si on les superpose : $EO' + EE' = O = \frac{I}{2}$
- 3) Si $\alpha = 90^\circ$ et si $\alpha = 270^\circ$, l'intensité de l'image ordinaire est à son

maximum : $EO' = O$, tandis que l'intensité de l'image extraordinaire est nulle : $EE' = 0$.

De ces observations, on peut trouver la loi reliant l'intensité des rayons réfractés avec l'angle α :

$$OO' = \frac{I}{2}\cos^2(\alpha) \text{ et } OE' = \frac{I}{2}\sin^2(\alpha)$$

$$EO' = \frac{I}{2}\sin^2(\alpha) \text{ et } EE' = \frac{I}{2}\cos^2(\alpha)$$

résultats qui sont présentés comme la loi de Malus ou la loi du *cosinus carré*

C.3 Sur une propriété de la lumière réfléchie

C'est par cet intitulé du mémoire lu à l'Institut national, le 12 décembre 1808¹⁵ que Malus annonce une découverte essentielle qui va changer le regard des physiciens sur la lumière. Le récit de cette découverte a été consigné par Arago d'après les dires de Malus lui-même. Si l'histoire en est bien connue, elle mérite cependant d'être rappelée en raison de la portée de cette trouvaille :

*Ce physicien (...) 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.*¹⁶

Malus s'empare du nouveau phénomène qu'il soumet à plusieurs épreuves : c'est par exemple un faisceau de lumière naturelle, sans doute la lumière du Soleil, qui est dirigée, sous différentes incidences par un héliostat, sur la surface de l'eau ou sur une glace sans tain. En analysant avec un cristal de spath la lumière réfléchi par la surface de l'eau sous un angle de $52^{\circ}45'$, il constate qu'elle ne se divise plus, dans le cristal, en deux faisceaux comme l'eût fait la lumière naturelle, mais qu'au contraire, lorsque le plan de réflexion (qui contient le rayon incident et le rayon réfléchi) est parallèle à la section principale du cristal, elle se réfracte en un seul rayon, *suivant la loi ordinaire*. De même, lorsque le plan de réflexion est perpendiculaire à la section principale, elle se réfracte en un rayon, *suivant la loi extraordinaire*. Entre ces deux positions, deux rayons émergent du cristal, dont les intensités dépendent de l'angle entre les deux plans. Malus en conclut que *lorsque la lumière est réfléchi sous un certain angle à la surface d'un corps diaphane, elle acquiert les propriétés des rayons qui ont été soumis à l'action de la double réfrac-*

15. Ce mémoire a été publié dans le Bulletin de janvier 1809 de la Société philomatique de Paris.

16. Arago, OC, tome VII, pp. 376-377.

tion.¹⁷ Malus remarque également que la réflexion par les surfaces métalliques polies ne transmet pas ces propriétés à la lumière¹⁸ Les expériences de l'hiver 1808-1809, ont permis à Malus de découvrir la *polarisation par réflexion vitreuse* et le jeune officier a compris le rôle de *polariseur* joué par la surface vitreuse ou la surface de l'eau et celui d'*analyseur* rempli par le cristal de spath d'Islande, qui permet de déterminer l'état de polarisation d'un faisceau lumineux. Pourtant, il n'utilise pas encore le mot *polarisation* et il faut attendre le *mémoire sur de nouveaux phénomènes d'optique* lu devant la *Classe* le 11 mars 1811 pour qu'il soit employé avec les réticences que Malus exprime lui-même :

*En donnant à ces côtés le nom de PÔLES, j'appellerai POLARISATION la modification qui donne à la lumière des propriétés relatives à ces pôles. J'ai tardé jusqu'à présent à admettre ce terme dans la description des phénomènes physiques dont il est question : je n'ai pas osé l'introduire dans les Mémoires où j'ai publié mes premières expériences ; mais les variétés qu'offre ce nouveau genre de phénomènes et la difficulté de les décrire, me forcent à admettre cette nouvelle expression, qui signifie simplement la modification que la lumière a subie en acquérant de nouvelles propriétés qui ne sont pas relatives à la direction du rayon, mais seulement à ses côtés considérés à angles droits, et dans un plan perpendiculaire à sa direction.*¹⁹

Malus sait désormais comment déterminer l'état de polarisation d'un rayon lumineux que la rencontre avec un corps diaphane ou opaque est à même de modifier. Ainsi a-t-il l'idée de diriger la lumière solaire transmise par une glace de verre vers un miroir étamé, qui fera office d'analyseur, sous l'incidence de $35^{\circ}25'$. Il constate alors que si, sans changer l'inclinaison du rayon, on modifie l'orientation du miroir successivement vers le nord, l'est, le sud et l'ouest, l'intensité de la lumière réfléchiée par le miroir est *beaucoup moindre* lorsque la seconde glace est tournée vers le nord et le sud que lorsqu'elle est tournée vers l'est et l'ouest. Or, cette disposition est inversée pour la lumière réfléchiée par la première glace. Malus conclut que la lumière qui a traversé la lame de verre est composée de deux parties : 1°) de la lumière possédant tous les caractères des rayons modifiés par la traversée des cristaux biréfringents, qui est donc polarisée mais *en sens contraire* de celle qui a été réfléchiée 2°)

17. Malus, « Sur une propriétés des forces répulsives qui agissent sur la lumière », *Mémoires de la Société d'Arcueil*, tome 2, 1809, p. 254.

18. Malus, « Sur une propriété de la lumière réfléchiée par les corps diaphanes », lu à l'Institut national le 12 décembre 1808, *Bulletin de la Société philomatique de Paris*, janvier 1809, pp.266-269.

19. Malus, « Mémoire sur de nouveaux phénomènes d'optique », *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, vol.72, 1811, pp.393-398.

de la lumière qui n'a pas été modifiée, identique à la lumière incidente.²⁰ La lumière transmise par la lame à face parallèle est donc partiellement polarisée dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence, ou dans le *second azimuth*. La lumière réfractée par les milieux diaphanes subit donc une polarisation *partielle*.

C.4 Lumière transmise - Pile de glaces

François Arago, dans la biographie qu'il consacre à Fresnel, formule cette remarque qui a de quoi rendre songeur : *durant plus de deux mille trois cents ans (...), personne n'avait imaginé que la lumière réfléchie ne dût pas avoir toutes les propriétés de la lumière incidente, qu'un changement de route pût être la cause d'un changement de nature*²¹. La lumière ordinaire, celle de notre environnement est donc un mélange de lumière naturelle qui, émise par une source ne subit aucun de ces changements de route et de lumière polarisée à la suite de divers changements de directions (réflexion, réfractions simple et double, diffusion), à tel point que la lumière naturelle ferait presque figure d'exception. Les travaux de Malus ouvrent un champ immense d'expérimentations dont l'exploration va commencer avec Malus, Biot et Arago. Mais une théorie de la polarisation s'ébauche aussi et ces jeunes physiciens, réunis au sein de la Société d'Arcueil, sous l'aile des grandes figures que sont Laplace et Lagrange vont s'efforcer *de faire rentrer ces richesses nouvelles dans le cadre trop étroit de la théorie de l'émission*²². Un formalisme se met en place défini d'abord par des faits d'expérience et pour éviter toute confusion dans les interprétations, d'emblée Arago prévient :

*Pour qu'on n'étende pas au delà des bornes légitimes l'analogie d'un rayon polarisé et d'un aimant, il importe, toutefois, de bien remarquer que sur le rayon les pôles diamétralement opposés paraissent avoir exactement les mêmes propriétés ; quant aux pôles dissemblables, ils se trouvent constamment sur des points du rayon situés dans deux directions rectangulaires*²³.

L'idée de *plan de polarisation*²⁴ est dégagée :

Les lignes des espèces de diamètres qui sur chaque rayon joignent les pôles

20. Malus, « Mémoires sur de nouveaux phénomènes d'optique », lu le 11 mars 1811, *Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut de France*, Seconde partie, 1810, pp. 106-111 et *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, 1811, pp. 393-398.

21. Arago, OC, tome 1, 1854, pp. 143-144.

22. Edmond Bouty, *La Vérité Scientifique sa poursuite*, Paris, Ernest Flammarion, 1908, p. 224.

23. Arago, OC, tome 1, 1854, p. 141.

24. Dans le formalisme actuel de l'onde électromagnétique, le plan de polarisation est

*analogues méritent une attention toute particulière. Lorsque, sur deux rayons séparés, ces lignes sont parallèles, on dit les rayons polarisés dans le même plan. Je n'ai donc pas besoin d'ajouter que deux rayons polarisés à angle droit doivent avoir les pôles identiques dans deux directions perpendiculaires l'une à l'autre*²⁵.

Quant à Malus, il fournit une interprétation des nouveaux phénomènes dans la pure tradition newtonienne d'une lumière matérielle. Il y ajoute le modèle d'une molécule de lumière, configurée selon trois *axes principaux* a , b et c . Si l'on suppose que l'axe a donne la direction du mouvement, l'orientation des axes b ou c par rapport à la direction des forces répulsives du milieu déterminera l'état de polarisation du rayon²⁶. Malus détermine aussi expérimentalement, pour l'eau et pour le verre, l'angle de polarisation pour lequel la lumière réfléchie est totalement polarisée. Il effectue ces mesures avec une précision considérable — c'est Brewster qui le dit — et observe également que les rayons qui se réfléchissent intérieurement sur la surface d'émergence sont également polarisés mais avec un angle de polarisation différent de celui constaté sur la première surface. Il établit la relation entre les deux angles : *le sinus du premier angle est au sinus du second, dans le même rapport que les sinus d'incidence et de réfraction*²⁷. Un raisonnement de trigonométrie élémentaire permet, à partir de cette relation, de trouver que l'indice de réfraction du milieu diaphane est égal à la tangente de l'angle de polarisation, loi qui sera énoncée par Brewster seulement en 1815 ! L'Écossais indique que Malus a semblé renoncer à cette recherche, en raison de plusieurs exceptions constatées comme s'il doutait de l'existence d'une telle loi, ainsi que Newton avait douté, comme le dit Brewster, de la possibilité de réaliser des objectifs achromatiques. Biot explique que Malus avait effectué de longues recherches sur le sujet, sans trouver de relation marquée entre l'angle de polarisation et les facultés dispersives ou réfringentes des substances²⁸. C'est finalement l'Écossais qui résout les exceptions observées par Malus : la surface réfléchissante du verre étant souvent dégradée par des impuretés ou pouvant l'être

défini par la direction du vecteur d'onde \vec{k} , qui est la direction de propagation de l'onde, et celle du vecteur champ électrique \vec{E} .

25. Arago, *ibid.*, p. 141.

26. Malus, « Sur une propriété des forces répulsives qui agissent sur la lumière », *Mémoires de physique et de chimie de la Société d'Arcueil*, tome 2, 1809, pp. 254-267.

27. Malus, « Sur une propriété de la lumière réfléchie », *Mémoire de la Société d'Arcueil*, tome II, 1809, p. 152.

28. Biot, *Recherches expérimentales et mathématiques sur les mouvemens des molécules de lumière autour de leur centre de gravité*, Paris, Firmin Didot, 1814, p. xj.

par son exposition à l'air ambiant, toute cause pouvant modifier l'angle de polarisation de plusieurs degrés²⁹.

Arago a rejoint Malus sur le chantier de la polarisation de la lumière. Il démontre notamment que le plan de polarisation de la lumière transmise est perpendiculaire au plan de polarisation de la lumière réfléchi et ses évaluations photométriques ont permis d'établir que les deux faisceaux transmis et réfléchis renferment la même quantité de lumière polarisée, nouvelle loi qui portera désormais le nom d'Arago. Mais c'est Malus qui a l'idée d'augmenter de façon notable l'intensité de la lumière polarisée transmise, en lui faisant traverser plusieurs lames de verre parallèles entre elles, formant ce qu'il sera coutume d'appeler une *pile de glaces*.

On peut rendre les phénomènes que nous venons de rapporter plus sensibles, en décomposant par une seconde réfraction la portion de lumière non modifiée qui a traversé la première glace ; il suffit pour cela de faire passer le rayon à travers deux glaces parallèles au lieu d'une seule. Enfin, plus on augmentera le nombre de glaces, plus les propriétés que le rayon acquiert par la réfraction deviendront apparentes, parce que la lumière polarisée par transmission à chaque passage perd la faculté d'être réfléchi dans les réfractions suivantes, et s'accumule ainsi de plus en plus³⁰ ».

Une pile de glaces (ou de plaques) polarise donc la lumière dans un plan perpendiculaire à celui dans lequel se polarise la lumière par réflexion. L'intensité de la lumière polarisée, transmise augmente avec le nombre de plaques de la pile comme le montre ce raisonnement d'Arago³¹ :

- première glace : soit I l'intensité du rayon incident et A l'intensité du rayon réfléchi, polarisée dans le premier azimuth. L'intensité transmise est $I - A$, laquelle peut être séparée en deux parties : la quantité de lumière naturelle $I' = I - 2A$ et la quantité A polarisée par transmission dans le second azimuth (dont l'intensité est égale à celle de la lumière réfléchi, d'après la loi d'Arago).
- deuxième glace : la quantité A échappe à la réflexion partielle sur la deuxième glace et est intégralement transmise. La quantité I' subit une réflexion partielle et se sépare de la quantité A' réfléchi et polarisée dans le premier azimuth. La lumière transmise $I' - A'$ se divise en deux parties : une quantité A' polarisée par transmission dans le second azimuth et

29. D. Brewster, « On the laws which regulate the polarisation of light by reflexion from transparent bodies. », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1815, p. 127.

30. Malus, 1811, pp. 108-109.

31. Arago, OC, tome VII, pp. 326-327.

qui s'ajoute à la quantité A polarisée dans le même plan ; une quantité $I'' = I' - 2A' = I - 2A - 2A'$ de lumière naturelle ;

- et ainsi de suite... La lumière polarisée dans le second azimut s'enrichit après chaque traversée d'une plaque supplémentaire tandis que la lumière naturelle transmise diminue en intensité³².

Arago n'en dit guère plus sur le sujet en faisant cependant remarquer que pour obtenir la même intensité de lumière polarisée par transmission, il faut un nombre de plaques d'autant plus grand que l'inclinaison du faisceau incident se rapproche de la normale à la pile. Mais il n'appuie cette constatation par aucun résultat chiffré. L'étude systématique sera l'œuvre de Brewster. Animé par l'idée de découvrir le lien entre la polarisation obtenue par la traversée d'un cristal biréfringent et celle obtenue à l'émergence d'une pile de glaces, l'Écossais publie en janvier 1814 la loi exprimant la relation entre le nombre d'éléments et l'inclinaison du rayon incident : « the number of plates in any parcel multiplied by the tangent of the angle, at which it polarises light, is a constant quantity. »³³. Dans le meilleur des cas, en supposant les

79° 14'	74°	69° 4'	63° 21'	60° 8'	57° 10'	53° 28'	50° 5'	45° 35'	41° 44'
8	12	16	21	24	27	31	35	41	47

fig. C.2 – Nombre de plaques de *crown* qui polarisent totalement la lumière transmise en fonction de l'angle d'incidence.

Valeurs extraites de Brewster (Ibid., 1814, p. 223.) par Daguin (*Traité élémentaire de physique théorique et expérimentale*, deuxième édition, tome 4, Toulouse, Privat, Paris, Dezobry Tandou, 1881, p. 522.)

phénomènes de diffusion et d'absorption négligeables, on peut espérer, pour la lumière polarisée et transmise par la pile, une intensité égale à la moitié de l'intensité de la lumière incidente.

C.5 Polarisation *colorée* - Polarisation rotatoire

La polarisation *colorée*, rapportée par Arago en 1811 se manifeste par la formation des vives couleurs qu'acquièrent les lames cristallisées lorsque, après les avoir exposées à un faisceau de lumière polarisée, on analyse la lumière émergente avec un rhomboïde de spath-calcaire. Le phénomène qui

32. Un calcul plus complet est proposé par Mascart, *Traité d'optique*, tome premier, Paris, Gauthier-Villars, 1889, pp. 527-529.

33. Brewster, « On the Polarisation of Light by oblique transmission through all Bodies, whether crystallized or uncrystallized. », *Phil. Trans.*, 1814, p.219-230.

s'apparente aux anneaux colorés, formés par les lames d'air, observés et décrits par Newton va faire l'objet d'actives recherches de la part de Biot. Ce dernier échafaude une théorie de la polarisation qui peut se résumer ainsi : aux rayons ordinaire et extraordinaire émergeant d'un cristal biréfringent, polarisés à angle droit, correspond une orientation des axes des molécules de lumière. Elles acquièrent cette configuration à l'intérieur du cristal et la conservent de façon définitive : c'est la *polarisation fixe*. Biot imagine que les molécules se placent dans cet état de façon progressive. « Les molécules lumineuses, à mesure qu'elles avancent, tournent alternativement leurs axes, comme par une sorte d'oscillation, de part et d'autre des plans, où elles doivent définitivement se diriger. Je désignerai cet état par le nom de *polarisation mobile*.³⁴ » On peut utiliser l'image d'une aiguille aimantée, suspendue à un fil de torsion qui subit des oscillations amorties avant de s'immobiliser sous l'effet des forces magnétiques³⁵. Mais en dépit des nombreux efforts de Biot, tant du point de vue expérimental que théorique, il manque à la théorie de la polarisation mobile la loi de force satisfaisante pour décrire les actions subies par les molécules de lumière à l'intérieur du milieu.

Le lundi 4 juin 1821, dix ans après les observations d'Arago³⁶, dans un rapport fait à l'Académie des Sciences, Arago et Ampère donnent leur conclusion *sur un Mémoire de M. Fresnel relatif aux couleurs des lames cristallisées douées de la double réfraction*. Fresnel apporte une réponse théorique complète à la question de la polarisation chromatique, en utilisant le principe des interférences qu'il a si bien mis à profit dans sa théorie de la diffraction. Si un faisceau de lumière polarisé dans le plan représenté par PP' traverse une lame cristallisée biréfringente, comme une feuille de mica, dont le plan de section principale est représenté par OO' , il se sépare en deux autres faisceaux : un faisceau ordinaire F_o polarisé selon CO et un faisceau extraordinaire F_e polarisé à angle droit selon CE' . Les deux faisceaux suivent des routes en principe séparées, mais cette séparation est en fait insensible à cause de l'épaisseur réduite de la lame. Les vitesses des deux systèmes d'ondes sont différentes, de sorte qu'à la sortie de la lame, l'un des faisceaux se présente en retard par rapport à l'autre. La proximité des deux faisceaux ne leur permet cependant pas d'interférer car ils sont polarisés à angle droit. La traversée du cristal de spath d'un polariscope doit permettre de ramener les deux systèmes d'onde dans un même plan de polarisation où ils pourront interférer. Soit SS' la

34. Biot, *Précis élémentaire de physique expérimentale*, tome II, 2^e édition, Paris, Derville, 1821, pp. 515-516.

35. F. Leclerc, *ibid.* chap.2 note 120, pp. 138-142.

36. Arago croit utile de préciser : « le travail renvoyé à notre examen se composait d'un Mémoire lu à l'Académie le 7 octobre 1816, et d'un Supplément qui avait été parafé par M. Delambre le 19 janvier 1818. »

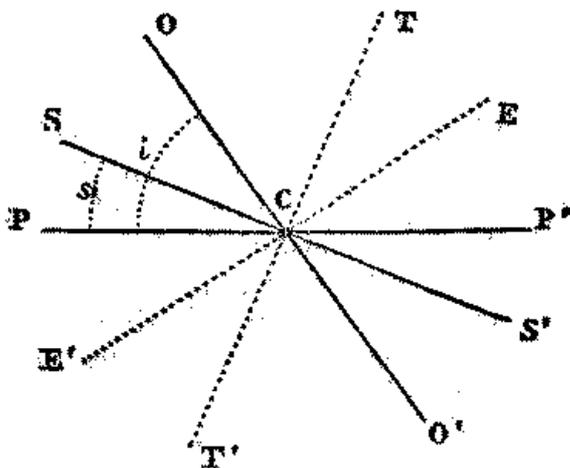


fig. C.3 – Modification des plans de polarisation de la lumière à la traversée d'une lame cristalline.

D'après Fresnel, *Annales de chimie et de physique*, tome XVII, Paris, 1821, p. 103.

section principale du rhomboïde au travers duquel on regarde. En le traversant, chaque faisceau se divise en deux : F_o engendre deux systèmes d'onde : F_{oo} polarisé dans le plan de section principale CS du rhomboïde ; F_{oe} polarisé dans le plan perpendiculaire CS'. De même F_e conduit aussi à deux faisceaux : F_{eo} polarisé dans le plan de section principale CS du rhomboïde ; F_{ee} polarisé dans le plan perpendiculaire CT'. Du cristal analyseur émergent quatre faisceaux dont les *amplitudes* ramenées aux plans de polarisation se calculent facilement en fonction des angles s et i , soit :

$F_{oo} = F \cos(i) \cos(i - s)$; $F_{eo} = F \sin(i) \sin(i - s)$, pour les faisceaux formant l'image ordinaire ;

$F_{oe} = F \cos(i) \sin(i - s)$; $F_{ee} = F \sin(i) \cos(i - s)$, pour ceux formant l'image extraordinaire ;

Il ne reste plus à Fresnel qu'à utiliser la formule qu'il a lui-même établie, exprimant l'intensité de la vibration résultant de la composition de deux systèmes d'onde présentant une différence de marche c :

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2 \cdot a \cdot a' \cdot \cos 2\pi \frac{c}{\lambda} \quad (\text{C.1})$$

où a et a' représente les amplitudes des oscillations dans leur plan de polarisation, ce que Fresnel appelle les *intensités des vitesses des oscillations*. Finalement, en appelant F l'amplitude de l'oscillation du faisceau incident, Fresnel obtient :

pour l'image ordinaire :

$$I_o = F^2[\cos^2 s - \sin 2i \cdot \sin 2(i - s) \cdot \sin^2(\pi \frac{c}{\lambda})]; \quad (\text{C.2})$$

pour l'image extraordinaire :

$$I_e = F^2[\sin^2 s + \sin 2i \cdot \sin 2(i - s) \cdot \sin^2(\pi \frac{c}{\lambda})]; \quad (\text{C.3})$$

On obtient ainsi l'intensité³⁷ pour chaque lumière simple (*monochromatique*) en fonction de sa longueur *d'ondulation*. On remarque immédiatement que $I_o + I_e = F^2$ pour toute les lumières simples, ce qui implique que les couleurs des deux images, ordinaire et extraordinaire, sont complémentaires : leur superposition donne le blanc. Il est de même facile de déterminer les angles i et s pour lesquelles les images sont blanches, ce qui est le cas lorsque la section principale de la lame cristallisée est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation ou à la section principale du rhomboïde. Toutes les observations d'Arago et de Biot se trouvent ainsi vérifiées par la théorie de Fresnel.

La rotation de la lumière polarisée a été découverte par Arago en 1811. Lorsqu'un faisceau de lumière polarisée subit une réflexion ou une réfraction à la rencontre d'un corps diaphane, le faisceau réfléchi ou transmis est toujours polarisé, mais non plus dans le plan de polarisation primitif. Cette *déviatio*n du plan de polarisation est ce qu'Arago appelle *dépolarisation*. Arago constate que cette dépolarisation observée avec des lames minces de talc de Moscovie (mica) apparaît également avec des lames épaisses de *crystal de roche*. En l'occurrence, Arago choisit une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe de l'aiguille et qui ne présente pas de biréfringence. La lumière incidente est totalement polarisée par réflexion sur un miroir. Arago observe la lumière réfléchie du Soleil à travers une lunette prismatique de Rochon. En faisant tourner la lunette, il l'amène à une position où seule est visible l'une des images de l'astre. L'interposition de la lame de quartz devant l'objectif provoque l'apparition de la seconde image affichant une couleur *rouge très foncé*, tandis que la première image se pare de la couleur complémentaire, ce qu'il est facile de vérifier en constatant que la partie commune des deux images est parfaitement blanche. En faisant tourner la lunette autour de son axe, on provoque la ronde des couleurs prismatiques et de leurs complémentaires. C'est surtout Biot, le collègue d'Arago qui va passer au peigne fin le phénomène de la polarisation rotatoire et dégager certaines de ses lois essentielles. Dans son *Traité de physique*, Biot décrit ses découvertes :

37. Pour Fresnel, il s'agit bel et bien de l'intensité de la *sensation*, proportionnelle au carré de la vitesse, c'est à dire à la *force vive*.

*J'ai trouvé ainsi que toutes les plaques tirées d'une même aiguille détournent le rayon de sa polarisation primitive dans un même sens, et d'un angle exactement proportionnel à leur épaisseur; en sorte qu'après sa transmission, il se trouvait encore complètement polarisé suivant cette nouvelle direction. J'ai mesuré la quantité de cette déviation dans une même plaque pour différens rayons simples obtenus par la décomposition de la lumière solaire; j'ai trouvé qu'elle était croissante avec la réfrangibilité de ces rayons, et réciproquement proportionnelle aux longueurs de leurs accès.*³⁸

Les valeurs fournies par Biot³⁹, reproduites ci-dessous, montrent l'amplitude de la dispersion rotatoire : sur l'étendue du spectre visible :

Rouge extrême	17°, 496
Limite du rouge et de l'orangé	20°, 47989
de l'orangé et du jaune	22°, 3138
du jaune et du vert.	25°, 6752
du vert et du bleu.	30°, 0460
du bleu et de l'indigo.	34°, 5717
de l'indigo et du violet.	37°, 6828
du violet extrême.	44°, 0827

On peut ainsi comprendre les couleurs observées par Arago : en supposant le faisceau incident, polarisé selon OP , la traversée de la lame de quartz provoque la rotation de la polarisation de chaque rayon coloré, d'un angle noté respectivement ici α_r , α_v , α_b pour les radiations rouge, verte et bleue.

La lumière est ensuite analysée par la traversée du *biprisme de Rochon* dont les axes perpendiculaires sont représentés par OA et OA' . Les projections des segments représentent les amplitudes des radiations colorées sur chacun de ces axes d'où l'on déduit les intensités relatives des différentes couleurs présentes dans les deux images observées. L'amplitude de la radiation *rouge* prédomine sur l'axe OA tandis que les radiations *bleue* et *verte*, dont le mélange donne le *cyan* sont les plus représentées selon l'axe OA' . Ce sont donc bien deux couleurs *complémentaires*, le rouge et le cyan, qui apparaissent dans l'oculaire du polariscope d'Arago.

38. Biot, *Précis élémentaire de physique expérimentale*, seconde édition, tome II, Paris, Deuterville, 1821, p.590.

39. Biot, *ibid.* p.591.

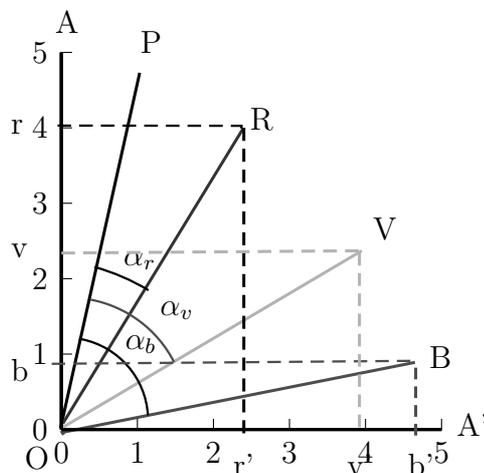


fig. C.4 – Polarisation rotatoire.

Rotation des plans de polarisation pour les radiations simples : le rouge, le vert et le bleu.

C.6 Premier polariseur pratique : le prisme de Nicol

La traversée d'un faisceau de lumière naturelle par un cristal biréfringent permet d'obtenir un faisceau de lumière polarisée, qui n'est pas dévié par rapport au faisceau incident : c'est le faisceau ordinaire. Cela simplifie les montages optiques, en comparaison de la polarisation par réflexion vitreuse, nécessitant des miroirs orientables. Mais il reste le faisceau extraordinaire qui lui est dévié. Il est avantageux de s'en débarrasser afin d'éviter, au cours de l'analyse, la multiplication des images. Une première solution consiste à utiliser certains cristaux biréfringents qui possèdent la propriété d'absorber inégalement les rayons qui les traversent. Parmi ces cristaux qualifiés de *dichroïques*, se trouvent les *tourmalines* qui vont transmettre une lumière polarisée perpendiculairement à l'axe du cristal mais dont l'intensité est malheureusement très affaiblie par rapport au faisceau incident⁴⁰. Cet inconvénient justifie l'abandon comme polariseur des lames de tourmaline au profit de la solution apportée en 1828 par le physicien et géologue écossais William Nicol (1766-1857). Ce dernier a l'idée de scier un cristal de spath selon un plan diagonal dont la trace est représentée par AA_1 et perpendiculaire au plan de section principale, défini ici par l'arête AC_1 et par la petite diagonale AC . Les deux moitiés ainsi obtenues sont recollées ensemble, avec

40. Lire à ce sujet G. Bruhat, *Cours de physique générale, optique*, Paris, Masson, 1954, p. 294-295.

interposition d'une mince couche de *baume du Canada*, térébenthine issue du *sapin baumier* dont l'indice de réfraction est $n = 1,538$.

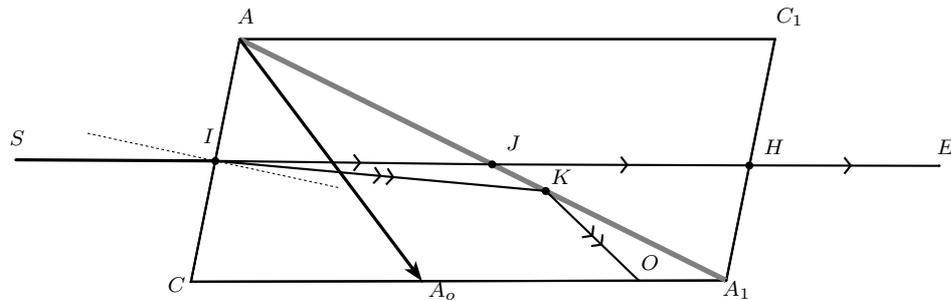


fig. C.5 – Prisme de Nicol.

Trajet des rayons ordinaire et extraordinaire dans le plan de section principale.

La représentation de la marche des rayons dans le plan de section principale montre que le rayon incident SI donne deux rayons réfractés : le rayon extraordinaire IJ et le rayon ordinaire IK . Ce dernier rencontre la section diagonale AA_1 sous un angle d'incidence plus élevé que le rayon extraordinaire. Sa réfraction sur le baume du Canada correspond au passage d'un milieu d'indice $n_o = 1,658$ à un milieu d'indice plus faible. Comme l'angle d'incidence est supérieur à l'angle de réfraction limite égal à : $\arcsin\left(\frac{1,538}{1,658}\right) = 68,07^\circ$, le rayon ordinaire est totalement réfléchi, selon la direction KO . On prend la précaution de noircir les faces latérales du prisme de façon à absorber cette lumière ordinaire. Pour le rayon extraordinaire, sa rencontre avec le baume du Canada au point J le fait passer d'un milieu d'indice $n_e = 1,486$ à un milieu d'indice plus élevé. Il n'est pas réfléchi, il continue sa route dans le cristal puis émerge parallèlement au rayon incident mais légèrement translaté par rapport à ce dernier. Le prisme de Nicol permet donc d'obtenir un rayon unique qui émerge du cristal quasiment dans la même direction que le rayon incident. De plus, le rayon émergent est entièrement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan de section principale.

Annexe D

Le Bureau des longitudes

D.1 Longitudes et Connaissance des tems

L'établissement d'un *Bureau des longitudes* fait suite à la proposition de Lakanal dont les motifs furent exposés par l'Abbé Grégoire, dans son rapport lu devant la Convention nationale, le 7 messidor de l'an III¹.

« Faire fleurir notre marine », ainsi Grégoire exprime-t-il l'ambition de donner à nos vaisseaux les moyens de disputer à la *tyrannie britannique* (sic) la maîtrise des mers. Cela suppose la capacité de fournir aux *pilotes* les données astronomiques permettant la détermination précise de la longitude en mer. Aussi, la loi du 7 messidor de l'an III (ci-dessus, figure D.1) attribue-t-elle au nouvel organisme la responsabilité de l'Observatoire de Paris et celui de la *cy-devant* École militaire. Elle le dote également de la riche collection de *tous les instruments d'astronomie appartenant à la Nation*².

Si la latitude peut être connue facilement par la mesure de la hauteur d'un astre (le Soleil) sur l'horizon, la détermination précise de la longitude, qualifiée souvent de *secret des longitudes* est un problème difficile dont la résolution mobilisa la communauté scientifique à travers toutes les puissances maritimes jusqu'à l'invention d'horloges de marine fiables, instruments qui resteront malheureusement longtemps très coûteux. La méthode astronomique repose sur le principe exposé par Fontenelle (Bernard Le Bouyer de Fontenelle, 1657-1757), le Secrétaire perpétuel de l'Académie, dans son mémoire « Sur la recherche des longitudes en mer »³ :

Pour ne parler encore que des latitudes, & des longitudes prises sur terre,

1. L'histoire et les œuvres du Bureau des longitudes sont très bien documentées dans la compilation réalisée par Nicole Capitaine, Colette Le Lay et Guy Boistel à partir des notices de Guillaume Bigourdan (1851-1932).

2. Une description précise de la dotation de l'Observatoire à ce moment est donnée dans James Lequeux, *François Arago, un savant généreux. Physique et astronomie au XIX^e siècle*, Paris, 2008, l'Observatoire de Paris, 224-233.

3. Fontenelle, « Sur la recherche des longitudes en mer », *HARS*, 1722, 96-107.

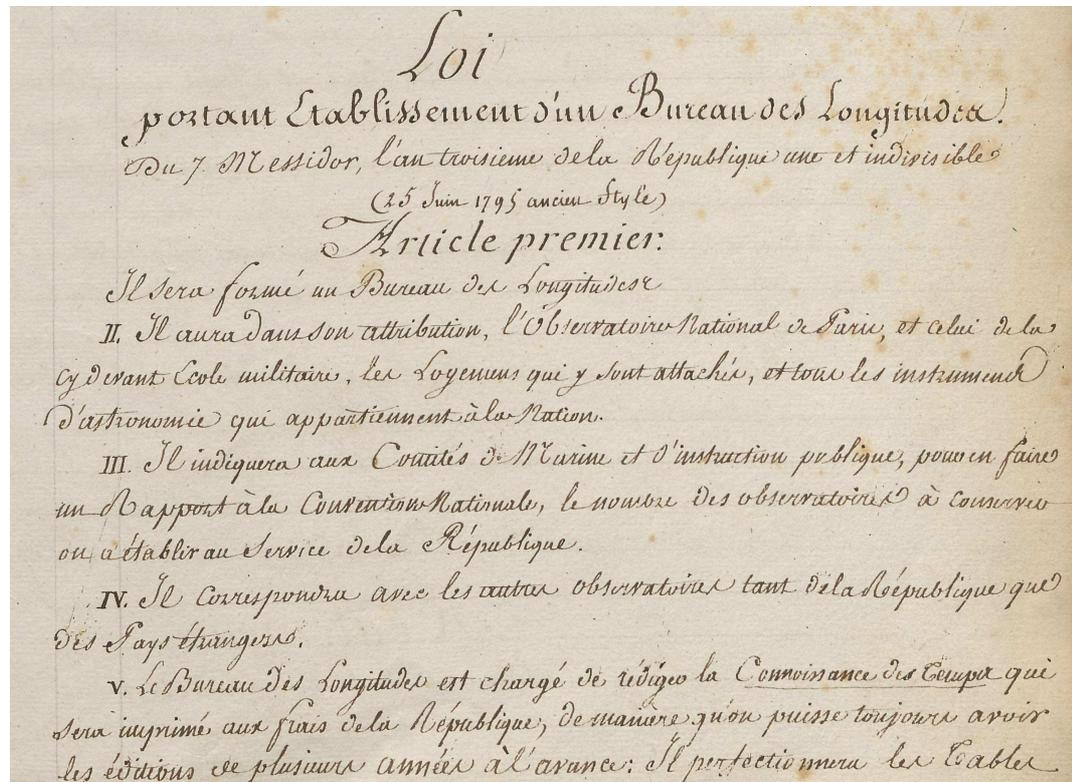


fig. D.1 – Loi du 7 messidor An III, articles I à V.

il est beaucoup plus aisé d'avoir les unes que les autres. On a les latitudes par les hauteurs du Soleil ou de quelqu'autre Astre dont la distance à l'Equateur ou au Pole est connuë, & cette observation est facile, & se peut faire presque aussi souvent que l'on veut. Mais pour une longitude, ou difference de deux Meridiens, il faut dans le Ciel un spectacle commun à deux Observateurs placés sous les deux Meridiens, & que de la difference des heures où chacun aperçoit ce même spectacle, on conclüë la distance des Meridiens.

Mais, comme le souligne Fontenelle, les *spectacles*, c'est à dire les événements du ciel, observables et utilisables pour la détermination des longitudes ne sont pas nombreux. Par exemple, les éclipses de Lune, facilement observables sont cependant trop rares pour connaître la longitude et *faire le point* avec une fréquence suffisante. En revanche, les éclipses des satellites galiléens de Jupiter offrent le moyen de mesures moins espacées dans le temps. Observables avec une lunette d'approche, elles sont connues depuis longtemps. Il faut se rappeler que c'est l'observation des lunes *jovienne* qui a permis à Jean-Dominique Cassini (dit Cassini I, 1625-1712) et à Olaus Roemer (1644-1710) de montrer la finitude de la vitesse de la lumière. La géographie et l'astrono-

mie nautique sont surtout attentives aux *immersions* et aux *émersions*⁴ du premier satellite jovien, *Io*, car il est, de toutes les lunes connues, celui dont l'orbite est la plus proche de Jupiter et dont la révolution est la plus rapide. Elle s'effectue en 42 h et 29 mn, ce qui permet d'observer quatre émersions et immersions en une semaine. Elles sont annoncées chaque année pour le méridien de Paris, dans la *Connaissance des Temps*⁵. Ces tables tiennent donc lieu d'un « *Observateur perpétuel placé sur le Meridien de Paris* »⁶. Pour trouver la longitude d'un lieu, par rapport au méridien de Paris, il faut observer en ce lieu une émersion ou une immersion d'un satellite de Jupiter et comparer le temps vrai de l'observation avec l'heure et la minute de la même éclipse calculée pour Paris. La réduction de la différence de temps en *parties de l'Equateur* fournit la longitude du lieu par rapport à l'Observatoire de Paris.

La loi définit précisément les missions du Bureau des longitudes : il rédigera la *Connaissance des Temps* dont l'impression se fera aux frais de la République et il perfectionnera les Tables astronomiques et les méthodes des longitudes. Il veillera à la publication des observations astronomiques mais aussi météorologiques⁷. Il s'agit évidemment de combler le retard pris par la France dans cette recherche par rapport à sa rivale britannique. Le désastre des Îles Scilly en 1707 avait conduit au « *Longitude Act* » voté par le Parlement britannique en 1714 : par ce texte, plusieurs personnalités se voyaient chargées d'administrer les récompenses destinées à tout chercheur apportant une contribution significative à la découverte d'une méthode de détermination de la longitude en mer⁸. Si le fonctionnement du *Board of Longitudes* peut être qualifié d'*inspiration libérale*, le Bureau des longitudes français est pensé par ses créateurs comme une institution de l'État, dont les membres deviennent des hauts fonctionnaires aux émoluments fixés par la loi. Ceux-ci se montent à huit mille livres pour un membre titulaire du Bureau et à quatre mille livres pour un astronome adjoint.

4. La *Connaissance des temps* fournit la signification de ces termes. « On appelle Immersion le temps auquel le Satellite cesse de paroître, en tombant dans l'ombre que le corps de Jupiter jette du côté opposé au Soleil; on appelle Emersion, le moment auquel le Satellite commence à paroître en sortant de l'ombre de Jupiter, comme on appelle Immersion, ou Emersion de la Lune le temps où elle entre dans l'ombre de la terre, ou bien celui où elle sort de cette ombre. ». CdT, année 1726, p.152.

5. La *Connaissance des temps* publie annuellement et sans interruption depuis 1679, les *éphémérides* astronomiques des corps célestes du système solaire.

6. Fontenelle, *ibid.* 100.

7. Ces dernières se verront considérablement augmentées sous l'impulsion d'Urbain le Verrier (1811-1877), directeur de l'Observatoire de 1854 à 1870 et de 1873 à 1877.

8. Sur ce sujet, lire Guy Boistel, *L'astronomie nautique au XVIII^e siècle en France : tables de la Lune et longitudes en mer*, Thèse, Université de Nantes, 2001.

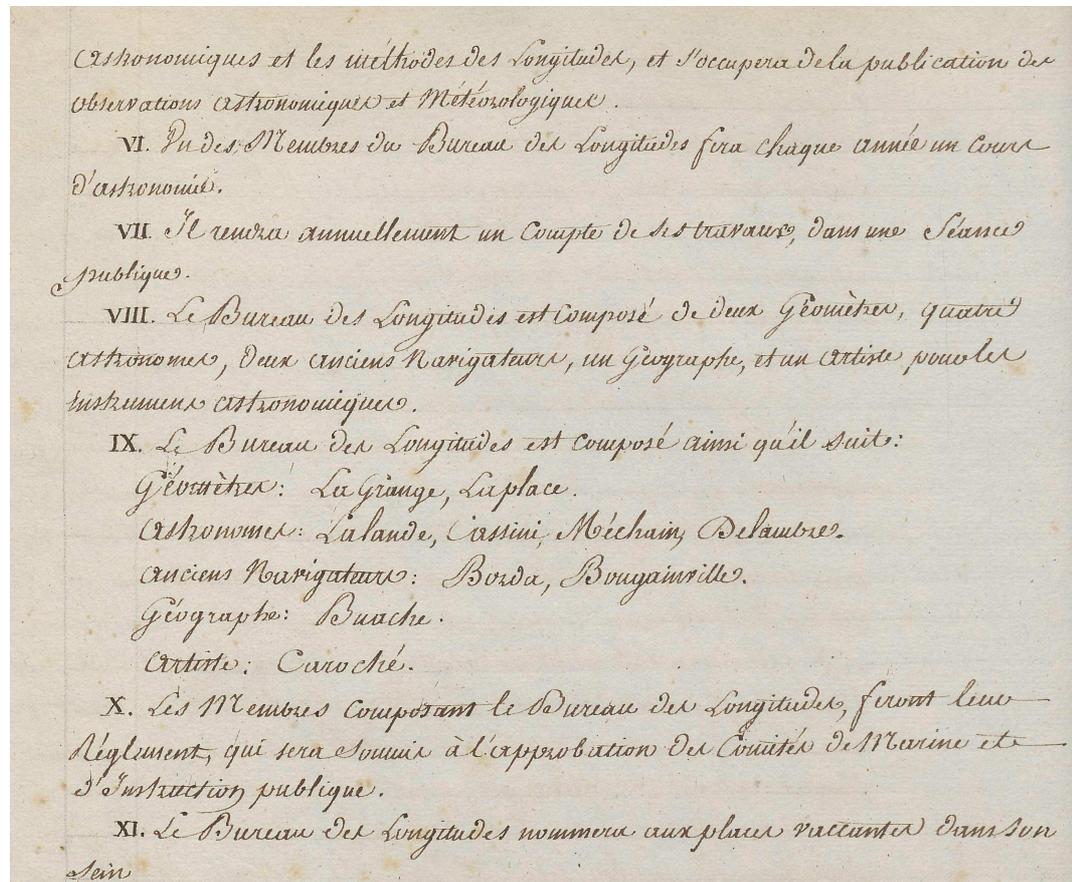


fig. D.2 – Loi du 7 messidor An III, articles VI à XI.

La composition très éclectique du premier bureau mêle géomètres, astronomes, navigateurs et géographes. Il faut aussi noter, dans cette assemblée, la participation de l'artiste Caroché ou Caroché (Noël Simon Caroché, 1744-1813)⁹. Enfin, un des membres du Bureau des longitudes sera chargé d'un cours d'astronomie. C'est Lalande (Jérôme de La Lande, 1732-1807) qui, le premier, assurera ce cours d'astronomie, qui se tiendra, provisoirement, au Collège de France.

D.2 Arago au Bureau des longitudes

C'est par l'intermédiaire de Siméon-Denis Poisson (1781-1840), qu'il a rencontré à l'École polytechnique que François Arago est présenté à Laplace.

9. Sur l'art de Caroché, lire Jérôme Lalande, « Notice sur les ouvrages des citoyens LENOIR, CAROCHÉ et FORTIN », *Magasin encyclopédique ou journal des sciences et des arts*, troisième année, tome quatrième, Paris, 1797, 147-153.

Ayant appris la vacance du poste de Secrétaire de l'Observatoire, Poisson souhaitait que cette place fût offerte à Arago mais il lui fallait le cautionnement de Laplace. Fonvielle raconte l'entrevue :

*L'auteur de la Mécanique céleste fut charmant ; il interrogea Arago pour la forme, et l'affaire fut arrangée en un instant.*¹⁰

Le 5 pluviôse de l'an XIII, le Bureau des longitudes ne peut qu'entériner le marché : « M. de Laplace propose pour la place de secrétaire bibliothécaire de l'Observatoire Dominique François Jean Arago, né à Espagel [Estagel] le 28 février 1786, chef de brigade des élèves de l'Ecole polytechnique, dont on atteste le talent. Le scrutin est unanime. On lui donnera le logement occupé ci-devant par M. Bouvard.¹¹ »

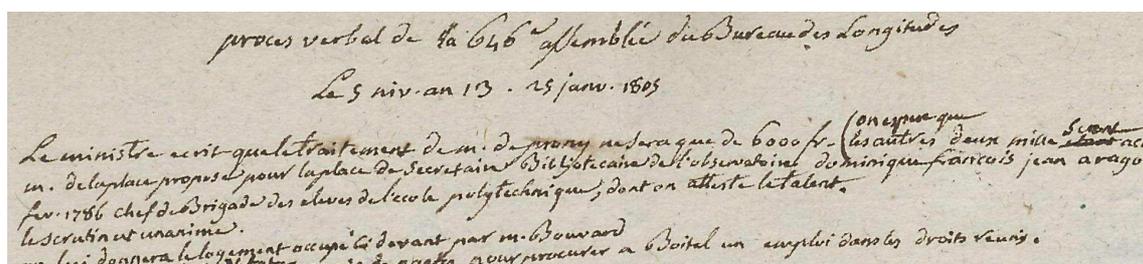


fig. D.3 – Nomination d'Arago comme Secrétaire bibliothécaire de l'Observatoire, le 25 janvier 1805. On notera une coquille sur le lieu de naissance d'Arago : il s'agit d'Estagel et non pas *Espagel*. La date indiquée, *5 niv an XIII*, est manifestement erronée. *Les procès-verbaux du Bureau des longitudes*.

10. Wilfrid de Fonvielle, *La jeunesse d'un grand savant républicain*, Paris, Émile Gaillard, p.60.

11. « Procès-verbal de la 646^e assemblée du Bureau des Longitudes le 5 niv. An 13 », 1805-01-25, *Les procès-verbaux du Bureau des longitudes*.

Annexe E

États de service des physiciens

Antoine Philibert Masson

Jules Macé de Lépinay

Jules Violle

André Blondel

Antoine Philibert)

État de services de M. Masson, agrégé, à
la faculté des sciences de Paris.

1824	Volontaire sous l'artillerie à cheval de la garde
janvier 1825	Préparateur de Physique et de Chimie à l'école royale forestière.
27 ^{ème} 1828	Nommé à l'école normale
8 ^{ème} 1829	Élu chargé de conférences aux classes de philosophie à l'école normale
9 ^{ème} 1830	Nommé agrégé.
— 1830	Nommé professeur de Mathématiques à Montpellier.
9 ^{ème} 1830	Nommé élève répétiteur à l'école normale.
24 ^{ème} 1831	Professeur de Physique au collège royal de Caen
2 ^{ème} mars 1839	Professeur suppléant de Physique au collège royal de Montp.
30 ^{ème} 1842	Professeur suppléant de Physique au collège Louis le Grand.
janvier 1840	Charge de cours de Physique à la faculté des sciences de Paris.
8 ^{ème} 1841	Nommé Agrégé, après concours, près la faculté des sciences de Paris.
9 ^{ème} 1842	Charge de cours de Physique à la faculté des sciences de Paris.
9 ^{ème} 1841	Nommé professeur à l'école des arts et manufactures.
2 ^{ème} juin 1835	Nommé membre de la commission chargée d'examiner les institutions primaires de Calcutta.
13 ^{ème} 1836	Nommé membre du conseil académique de Caen
9 ^{ème} 1837	— Membre de la commission d'instruction primaire de Calcutta.
1 ^{ère} 1837	Nommé membre de la commission d'inspection de l'école normale primaire de Calcutta.

4

fig. E.1 – États de service du professeur Antoine Philibert Masson de 1824 à 1843. (Base Léonore)

7^{bre} 1839 Homme juge de concours d'agrégation pour les
 classes de 1^{re} et 2^{de}.
 15 juillet 1841 Homme juge de concours d'agrégation pour les
 sciences physiques.
 9^{bre} 1841 Homme membre de la commission chargée de discuter
 les compositions de physique des collèges royaux.
 8 août 1842 Homme juge du concours pour l'agrégation de
 sciences physiques.
 26 avril 1843. Délégué pour l'achat et la réception de livres
 de physique pour le collège royal.
 Cités honorifiques.
 Docteur en sciences physiques. — Licencié en sciences
 mathématiques. — Licencié en sciences naturelles.
 membre de la Société philomathique de Paris; de
 l'Institut d'encouragement, de l'Académie royale de
 la Cour de Rome de plusieurs autres et a été nommé
 imprimerie dans les Almanachs des savants étrangers
 de l'Institut.
 Vu et Confirmé par le directeur
 général des études administrateur
 de l'Académie de Paris le Collège royal de Louis le Grand,
 Paris le 7 juillet 1843. déclare que les faits énoncés dans le
 tableau précédent sont exacts.
 Nouvelles
 J. Siemon
 Ju

fig. E.2 – États de service du professeur Antoine Philibert Masson de 1824 à 1843. (Base Léonore)

Résumé des services de M. Macé de Lépinay
(Jules Charles Antonin).

Élève à l'École Normale Supérieure :
29 Octobre 1872.

Professeur de Physique au lycée de Grenoble :
30 septembre 1875.

Professeur de Physique au lycée de Marseille :
23 septembre 1878.

Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de
Marseille : 29 septembre 1880.

Chargé du cours de Physique à la Faculté des
Sciences de Marseille : 17 Octobre 1885.

Professeur de Physique à la Faculté des Sciences
de Marseille : 20 Février 1886.

fig. E.3 – États de service du professeur Jules Macé de Lépinay. (Base Léonore)

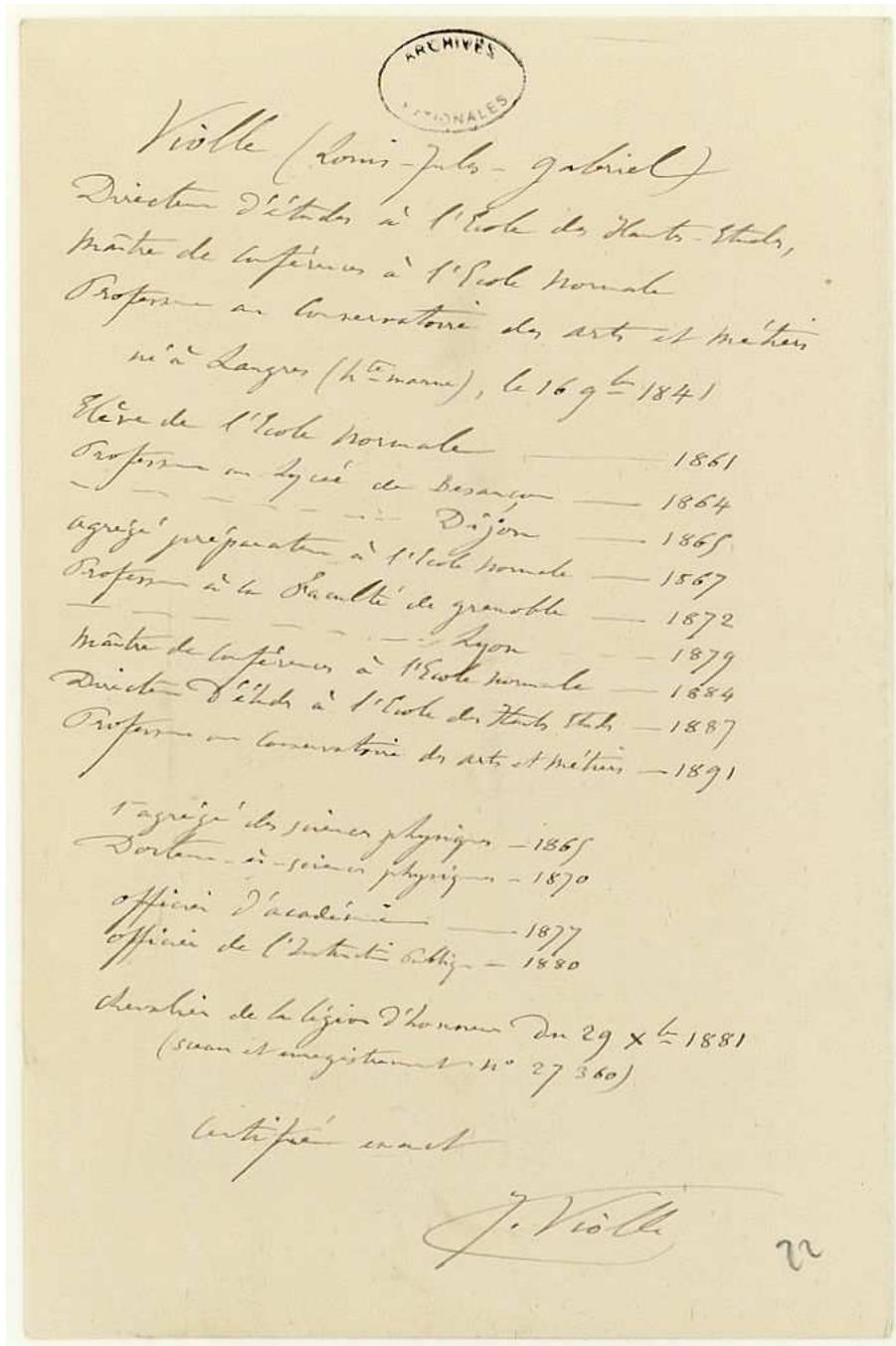


fig. E.4 – États de service du professeur Jules Violle. (Base Léonore)

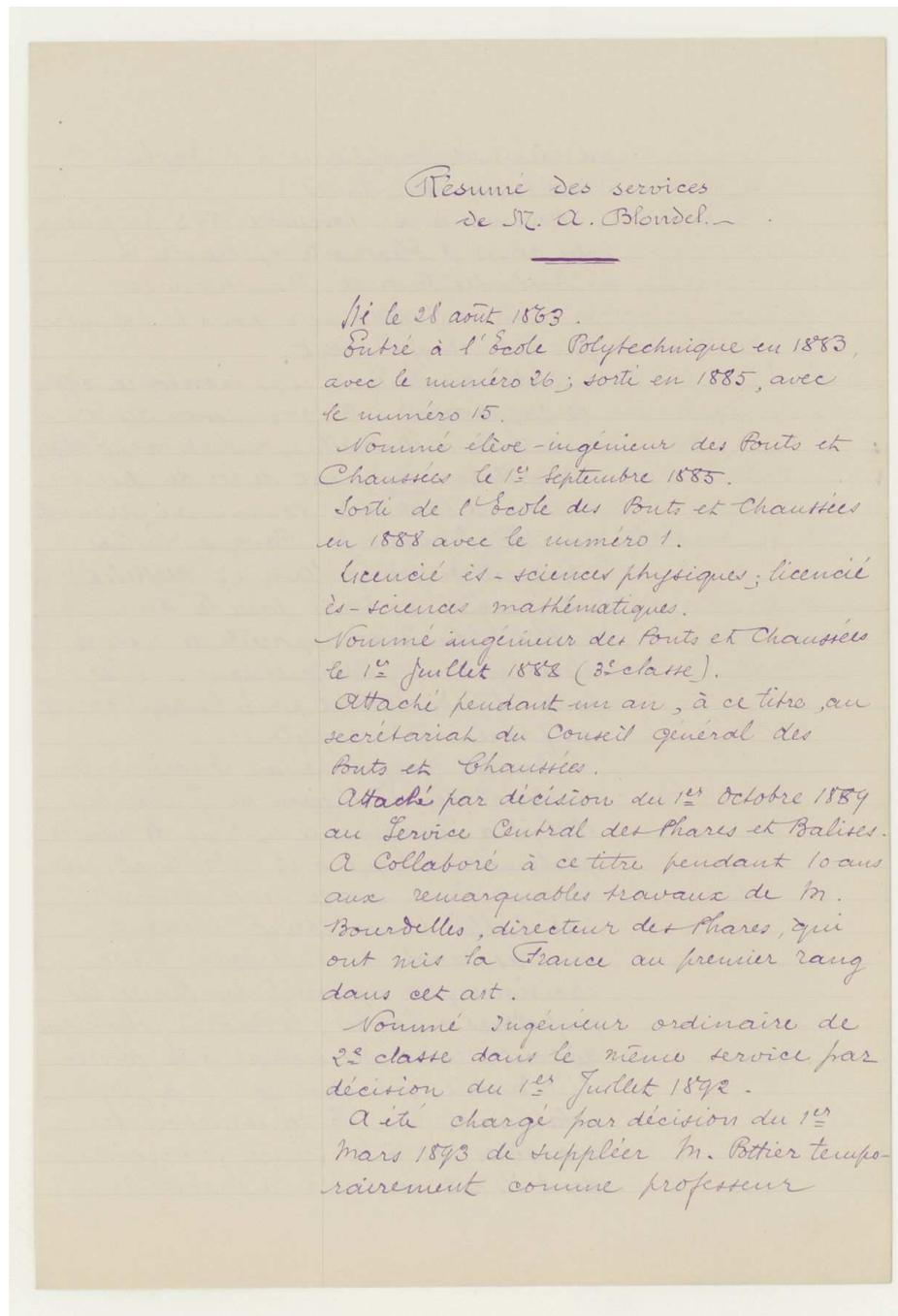


fig. E.5 – États de service du professeur André Blondel. (Base Léonore)

d'électricité appliquée à l'École nationale des Mines.

Nommé le 21 novembre 1893 professeur du cours d'électricité appliquée à l'École des Ponts et Chaussées avec mission d'y organiser pour la première fois cet enseignement.

A été nommé en 1897 secrétaire-adjoint et rapporteur à la commission des distributions d'électricité au Ministère des Travaux Publics.

A collaboré au projet de loi des distributions d'électricité soumis au Parlement par le Ministre des Travaux Publics (Rapport de M. Guillaumet et Berthelot).

A imaginé et mis dans le domaine public plusieurs appareils de mesure électrique ou photométrique utiles pour l'industrie et pour les applications des phares et des projecteurs.

Comme rapporteur au Congrès International des Electriciens de Genève en 1896, il a imaginé le système de mesure photométrique qui a été adopté et est devenu d'un usage international.

A publié de nombreux travaux sur les machines électriques, l'arc électrique, les appareils des phares, les projecteurs militaires, la traction électrique, qui ont rendu des services à la fois à l'Industrie française, qui en a profité, notamment pour la construction des machines, et à la Science française, dont ils ont contribué à maintenir.

fig. E.6 – États de service du professeur André Blondel. (Base Léonore)

le prestige à l'étranger.
L'Académie des sciences lui a décerné à l'unanimité, en 1897, le prix Gaston Planté pour ses travaux en électricité et le prix Kestner - Boursault, en 1898, pour son livre "La traction électrique". Il est membre des Comités de l'Exposition, du Comité de la Société des Electriciens, du Comité du Congrès des Electriciens en 1900, etc.
A la suite de sa collaboration aux travaux du Phare d'Ackmuhl, a été nommé officier d'Académie, le 16 octobre 1897.
A été élu membre du Comité de la Société française de physique, de la Société internationale des Electriciens, etc.

fig. E.7 – États de service du professeur André Blondel. (Base Léonore)

Annexe F

Étalon Violle

F.1 L'étalon Violle

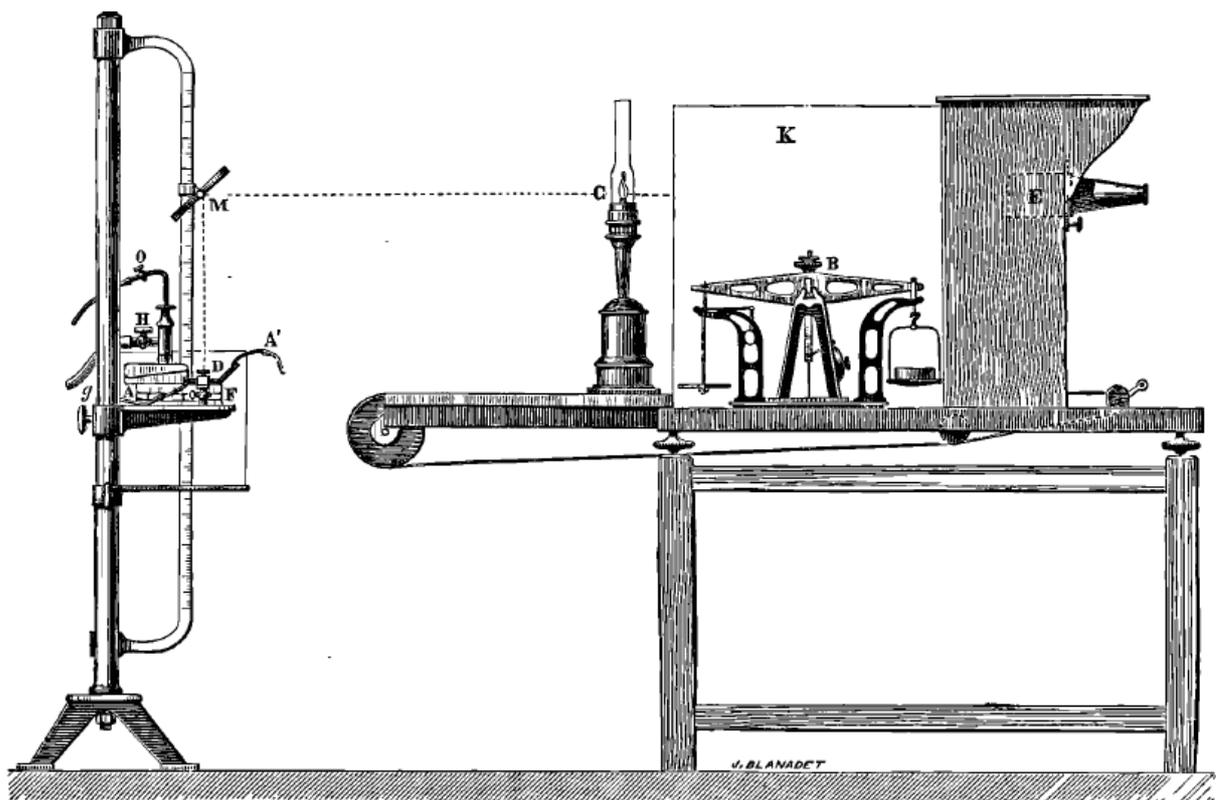


fig. F.1 – L'étalon Violle sur le banc de Deleuil. Tiré de Violle, « Sur l'étalon absolu de lumière », *Journal de physique théorique et appliquée*, sér. 2, t. 3, 1884, Paris, 246.

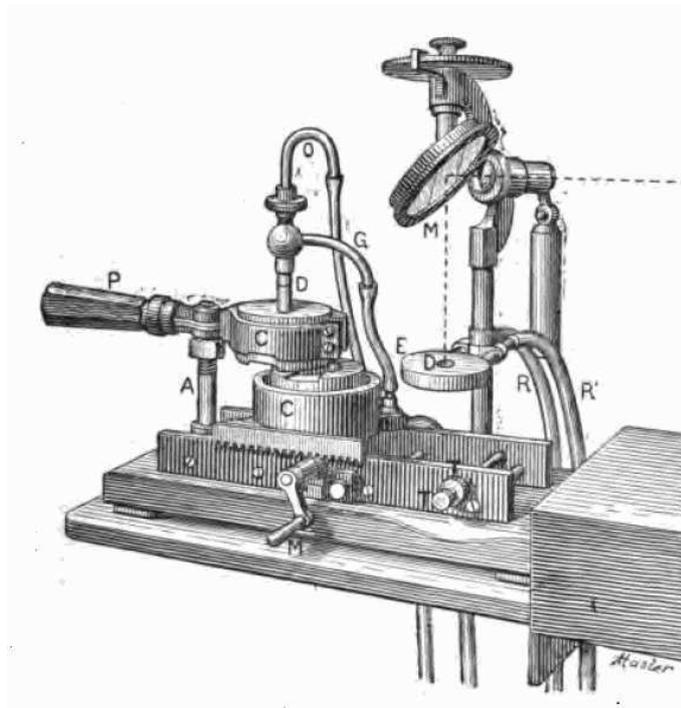


fig. F.2 – Modèle simplifié de l'étalon Violle. Tiré de Violle, « Sur l'étalon absolu de lumière », *ACP*, sér. 6, t. 3, 1884, Paris, 398.

F.2 La réalisation de Petavel

FIG. 6.—Apparatus used for fusing platinum with the oxy-hydrogen blow-pipe. T, oxygen blow-off valve; Q, hydrogen blow-off valve; S, automatic device for cutting off the gas from the blow-pipe (seen also in elevation in small inset figure at bottom); R, "rate" gauge; L and K, oxygen and hydrogen meters; G, "ratio" gauge; P, blow-pipe; D, diaphragm; H, cover of furnace; F, furnace; A, axis which supports the blow-pipe and diaphragm; M and N, electro-magnets.

The plan of the automatic device for replacing the blow-pipe by the diaphragm is shown in the right-hand small figure at bottom.
 N.B.—This figure is a purely diagrammatic representation of the apparatus, and is not drawn to scale.

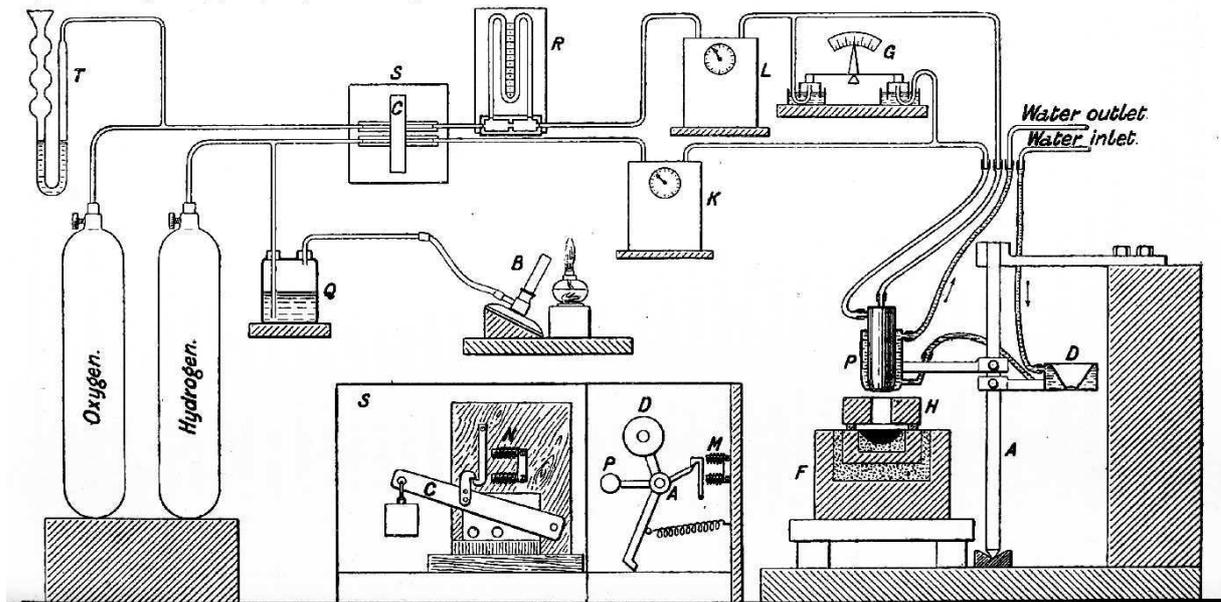


fig. F.3 – Reproduction de l'étalon Violle par Petavel. Tiré de Petavel, « An Experimental Research on some Sandards of light », *Proceedings of the Royal Society*, London, vol. 65, 1899, 488.

Bibliographie

Sources primaires

- [AB62] P. AUDOUIN et P. BÉRARD – « Étude sur les divers becs employés pour l'éclairage au gaz et recherches des conditions les meilleures pour sa combustion », *Annales de chimie et de physique* **65** (1862), p. 423–495.
- [ABT42] F. ARAGO, A. BOUTRON et A. TRÉBUCHET – « Rapport de la Commission d'éclairage par le gaz à Monsieur le Conseiller d'État, Préfet de Police », Préfecture de Police, 1842.
- [Acc16] F. ACCUM – *Traité pratique de l'éclairage par le gaz inflammable*, Paris, F. A. Winsor, 1816, Traduit de l'anglais sur la troisième édition de M. Accum, publié et augmenté par F. A. Winsor.
- [Ald23] G. ALDINI – *Saggio di osservazioni sui mezzi atti a migliorare la costruzione et l'illuminazione dei fari*, Milano, Dall' imperiale regia stamperia, 1823.
- [All89] E. ALLARD – *Les Phares Histoire-Construction-éclairage*, Paris, J. Rothschild, 1889.
- [Ame94] American Institute of Electrical engineers – *Proceedings of the international electrical congress held in the city of Chicago, august 21st to 25th, 1893.*, New York, 1894.
- [Ara11] F. ARAGO – « Sur une modification remarquable qu'éprouvent les rayons lumineux dans leur passage à travers certains corps diaphanes, et sur quelques autres nouveaux phénomènes d'optique », *Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut impérial de France* (1811), p. 93–134.

- [Ara54] — , « Oeuvres complètes tome iv », ch. Du magnétisme de rotation, p. 424–448, Paris, Gide et J. Baudry, Leipzig, Theodor Oswald Weigel, 1854.
- [Ara58] — , « Oeuvres complètes », vol. 10, ch. Mémoire sur les moyens de résoudre la plupart des questions de photométrie que la découverte de la polarisation de la lumière a fait naître, p. 150–167, Paris, Gide, Leipzig, Theodor Oswald Weigel, 1858.
- [Ara65] — , « Sur le photomètre de Leslie, », *Mémoires scientifiques* **1** (1865), p. 481–484.
- [Ara67] — , *Astronomie populaire*, Paris, L. Guérin, 1867.
- [BB58] A. BECQUEREL et E. BECQUEREL – *Résumé de l'histoire du magnétisme et de l'électricité*, Paris, Firmin Didot, 1858.
- [BCB15] C. BERTHOLLET, J. CHAPTAL et J. BIOT – « Rapport sur le Mémoire de M. Berard concernant les propriétés chimiques des divers rayons qui composent la lumière solaire », *Procès-verbaux de l'Académie des sciences* **5** (1812-1815), p. 146–149.
- [BdM40] C.-F. BAILLY DE MERLIEUX – *Nouveau manuel complet de physique*, Paris, Librairie encyclopédique de Roret, 1840.
- [Bec67] E. BECQUEREL – *La lumière, ses causes et ses effets*, vol. 1, Sources de lumière, Paris, Firmin Didot, 1867.
- [BFE13] J.-E. BÉRARD et D. FRANÇOIS-ÉTIENNE – « Mémoire sur la chaleur spécifique des différents gaz », *Annales de chimie* **85** (1813), p. 72–183.
- [Bio12] J.-B. BIOT – « Sur de nouveaux Rapports qui existent entre la réflexion et la polarisation de la lumière par les corps cristallisés », *Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut impérial de France* (1812), p. 135–280.
- [Bio14] J.-B. BIOT – *Recherches expérimentales et mathématiques sur les mouvemens des molécules de la lumière autour de leur centre de gravité*, Paris, Firmin Didot, 1814.
- [Bio16] — , *Traité de physique expérimentale et mathématique*, vol. 3, Paris, Deterville, 1816.
- [BIP19] BIPM – « Le Système international d'unités (SI) », 2019.

- [Blo93a] A. BLONDEL – « Au sujet de l'unité de lumière », *La Lumière électrique* **50** (1893), no. 44, p. 222–223.
- [Blo93b] — , « On the continuous current arc and its employment as a photometric standard », *Proceedings of the International Electrical Congress held in Chicago, 1893* (1893), p. 315–334.
- [Blo93c] — , « Sur le programme provisoire proposé pour le congrès international des électriciens de Chicago, en 1893. discussion sur la communication de M. Hospitalier. », *Bulletin de la Société internationale des électriciens* **10** (1893), p. 128–139.
- [Blo93d] — , « Sur un étalon secondaire pour la photométrie des lampes à arc », *Bulletin de la Société internationale des électriciens* **10** (1893), p. 128–139.
- [Blo94] — , « Grandeurs et unités photométriques », *La Lumière électrique* **53** (1894), no. 27, p. 7–15.
- [Blo96] — , « Résumé du rapport sur les unités photométriques », *Bulletin de la Société internationale des électriciens* **13** (1896), p. 354–365.
- [Blo01] — , « Les progrès des lampes électriques », *Congrès international d'électricité (Paris, 18-25 août 1900). Rapports et procès-verbaux*, 1901, p. 210–269.
- [BM23] I.-A. BORDIER-MARCET – « Notice descriptive d'un fanal à double aspect de nouvelle invention ; d'un système de fanaux à double aspect pour un phare à feu mobile ; de ses effets catoptriques et de ses avantages ; présenté à l'Exposition de l'industrie française de 1823 », *Annales de l'industrie nationale et étrangère ou Mercure technologique* **11** (1823), p. 258–282.
- [BM79] A. BERTIN-MOUROT – « Sur les houppes des cristaux polychroïques », *Journal de physique théorique et appliquée* (1879), p. 217–227.
- [Bou38] I. BOULLIAU – *De natura lucis*, Paris, 1638.
- [Bou19] P. BOUGUER – *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, Paris, Claude Jombert, 1719.
- [Bou27] — , *De la mâture des vaisseaux*, Paris, Claude Jombert, 1727.

- [Bou29] — , *De la methode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres*, Paris, Claude Jombert, 1729.
- [Bou49] — , *La figure de la terre, relation abrégée du voyage fait au pérou*, Paris, Charles-Antoine Jombert, 1749.
- [Bou60] — , *Traité d'optique sur la gradation de la lumière*, Paris, La Caille, 1760.
- [Bou45] A. BOUCHARDAT – *Physique élémentaire avec ses principales applications*, Paris, Germère-Baillère, 1845, Seconde édition.
- [Bou17] H. BOUASSE – *Vision et reproduction des formes et des couleurs*, Paris, Librairie Delagrave, 1917, Bibliothèque scientifique de l'ingénieur et du physicien.
- [Bér17] J.-E. BÉRARD – « Sur les propriétés des différentes espèces de rayons qu'on peut séparer au moyen du prisme de la lumière solaire », *Mémoires de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil* **3** (1817), p. 5–47.
- [Bér25] — , « LETTRE de M. Bérard à M. Gay-Lussac sur les Usines de gaz inflammable de la houille. », *Annales de chimie et de physique* **28** (1825), p. 113–128.
- [BR11a] A. BLONDEL et J.-A. REY – « Applications aux signaux de la loi de perception des lumières brèves à la limite de leur portée », *Journal de physique théorique et appliquée* **1** (1911), p. 643–655.
- [BR11b] — , « Sur la perception des lumières brèves à la limite de leur portée », *Journal de physique théorique et appliquée* **1** (1911), p. 530–550.
- [Bra20] W. BRANDE – « The Bakerian Lecture. On the composition and analysis of the inflammable gaseous compounds resulting from the destructive distillation of coal and oil, with some remarks on their relative heating and illuminating powers. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* (1820), p. 11–28.
- [Bra21] — , « SUR les Facultés lumineuses et calorifiques du gaz oléfiant, du gaz extrait du charbon de terre, et du gaz que fournit la décomposition de l'huile. », *Annales de chimie et de physique* **19** (1821), p. 196–207.

- [Bre13] D. BREWSTER – *A treatise on new philosophical instruments, for various purposes in the arts and sciences. With experiments on light and colours.*, Edinburgh, John Murray and William Blackwood, 1813.
- [Bri80] British Association for the Advancement of Science – *Report of the fiftieth meeting of the British Association for the Advancement of Science; held at Swansea in August and September 1880.*, London, John Murray, 1880.
- [Bro94] A. BROCA – « étude théorique et expérimentale sur les sensations visuelles et la photométrie », *Journal de physique théorique et appliquée* **3** (1894), p. 206–218.
- [BS02] A. BROCA et SULZER – « La sensation lumineuse en fonction du temps », *Journal de physiologie et de pathologie générale* **4** (1902), p. 632–640.
- [BS03] — , « Inertie du sens visuel des formes - Étude des lumières brèves au point de vue de l'acuité visuelle », *Journal de physiologie et de pathologie générale* **5** (1903), p. 293.
- [BSP53] J. BABINET, P. SÉGUIER et A. PAYEN – « Rapport sur un nouveau bec à gaz d'éclairage de M. JOBARD. », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **37** (1853), no. 21, p. 769–775.
- [Bur34] Bureau international des poids et mesures – *Huitième conférence générale des poids et mesures - Comptes rendus des séances*, Paris, Gauthier-Villars, 1934.
- [Caz76] A. CAZIN – « L'étincelle électrique », *Bibliothèque des merveilles*, Paris, Librairie Hachette, 1876.
- [CE17] W. W. COBLENTZ et W. B. EMERSON – « Relative sensibility of average eye to light of different colors and some practical applications to radiation problems », *Bulletin of the Bureau of Standards* **14** (1917), p. 167–236.
- [Cha87] A. CHARPENTIER – *Comptes rendus de la Société de Biologie* (1887), p. 5.
- [Cha91] — , « Oscillations rétiniennes », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* **113** (1891), p. 147.

- [CL81] A. CROVA et C.-J.-H. LAGARDE – « Détermination du pouvoir éclairant des radiations simples », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **93** (1881), p. 959–961.
- [CL82] — , « Détermination du pouvoir éclairant des radiations simples », *Journal de physique théorique et appliquée* **1** (1882), p. 162–169.
- [Cla39] J. CLAYTON – « An Experiment concerning the Spirit of Coals, being part of a Letter to the Hon. Rob. Boyle, Esq; from the late Rev. John Clayton, D. D. communicated by the Right Rev. Father in God Robert Lord Bishop of Corke to the Right Hon. John Earl of Egniont, F. R. S. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **41** (1739), p. 59–61.
- [Cle60] S. CLEGG – *Traité pratique de la fabrication et de la distribution du gaz d'éclairage et de chauffage, traduction de l'anglais par Ed. Servier*, Paris, Librairie scientifique, industrielle et agricole, Lacroix et Baudry, 1860.
- [Com37] Comité consultatif de photométrie – *Comptes rendus des séances*, Paris, Gauthier-Villars, 1937.
- [Con83] J. CONROY – « Some Experiments on Metallic Reflexion. N°III. On the Amount of Light Reflected by Metallic Surfaces. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* (1883), p. 26–41.
- [Cro78] A. CROVA – « Étude spectrométrique de quelques sources lumineuses », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **87** (1878), p. 322–325.
- [Cro80] — , « étude des radiations émises par les corps incandescents. mesure optique des hautes températures », *Annales de chimie et de physique* **19** (1880), p. 472–549.
- [Cro81] — , « Comparaison photométrique des sources lumineuses de teintes différentes », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **93** (1881), p. 512–513.
- [Cro82a] — , « Sur la photométrie », *La Revue scientifique de la France et de l'étranger* **3** (1882), no. 8, p. 225–231.
- [Cro82b] — , « Sur la photométrie », *La Revue scientifique de la France et de l'étranger* **3** (1882), p. 752–756.

- [Cro83] — , « Description d'un spectrophotomètre », *Annales de chimie et de physique* **26** (1883), p. 556–573.
- [Cro84] — , « Photométrie des foyers intenses de lumière », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **99** (1884), p. 1067–1069.
- [Cro85a] — , « Comparaison photométrique des lumières de teintes différentes », *Annales de chimie et de physique* **6** (1885), p. 528–546.
- [Cro85b] — , « Emploi des écrans diffusants en photométrie », *Annales de chimie et de physique* **6** (1885), p. 342–357.
- [CT25] R. CHRISTISON et E. TURNER – « On the Construction of Oil and Coal Gaz Burners and the circumstances that influence the Light emitted by the Gases during their Combustion; with some Observations on their relative Illuminating Power, and on the different modes of ascertaining it. », *The Edinburgh Philosophical Journal* **13** (1825), p. 1–39.
- [CT27] — , « De la Construction des Appareils (burners) destinés à brûler le gaz de l'huile et celui du charbon, et des circonstances qui influent sur la lumière émise par les gaz pendant leur combustion, avec quelques observations sur leur pouvoir éclairant relatif, et sur les différentes méthodes de l'estimer. », *Annales de chimie et de physique* **35** (1827), p. 309–325 359–393.
- [Cuv15] G. CUVIER – *Éloge de M. le Comte de Rumford lu à la séance publique de l'Institut, le 9 Janvier 1815, par M. Cuvier, secrétaire perpétuel*, Paris, 1815.
- [Cuv77] P. CUVELIER – « Les Experimenta crystalli Islandici disdiastastici d'Erasmus Bartholin. traduction française commentée », *Revue d'histoire des sciences* **30** (1977), no. 3, p. 193–224.
- [Dag62] P.-A. DAGUIN – *Traité élémentaire de physique théorique et expérimentale*, 2 éd., vol. 4, Toulouse, Édouard Privat, Paris, Dezobry Tandou, 1862.
- [Dav07] H. DAVY – « The bakerian lecture, on some chemical agencies of electricity », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **97** (1807), p. 1–56.

- [Dav22] — , « On the electrical phenomena exhibited in vacuo. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **112** (1822), p. 64–75.
- [DdM21] J.-J. DORTOUS DE MAIRAN – *Eclaircissement sur la cause générale du froid en hiver & de la chaleur en été*, Paris, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1721.
- [Del12] F.-E. DELAROCHE – « Observations sur le calorique rayonnant », *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts* (1812), p. 201–228.
- [Del63] P. DELEUIL – « Catalogue des instruments de physique, de chimie, d'optique et de mathématiques », ch. Notice historique - Photomètre pour mesurer le pouvoir éclairant du gaz, comparé à une lampe type brûlant 42 grammes d'huile à l'heure., p. xvii, Paris, Bourdier, 1863.
- [Des60] P. DESAINS – *Leçons de Physique*, Paris, Dezobry E. Magdeleine, 1860.
- [d'H45] E. R. D'HURCOURT – *De l'éclairage au gaz*, Paris, Carilian Goeury et Victor Dalmont, 1845.
- [d'H63] — , *De l'éclairage au gaz*, 2 éd., Paris, Dunod, 1863.
- [d'H69] — , « Gaz », *Études sur l'Exposition de 1867 ou Les archives de l'Industrie au XIXe siècle : description générale, encyclopédique, méthodique et raisonnée de l'État actuel des arts des sciences de l'industrie et de l'agriculture chez toutes les nations.*, 4, no. 16-20, Paris, Eugène Lacroix, 1869, p. 1–33.
- [dL89] A. DE LAVOISIER – *Traité élémentaire de chimie*, Paris, Cuchet, 1789.
- [DIR41] A. DE LA RIVE – « Sur la lumière de la pile. », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **12** (1841), p. 910–916.
- [DIR54] — , *Traité d'électricité théorique et appliquée*, vol. 1, Paris, J.-B. Baillièrre, 1854.
- [dNdC06] J.-B. DE NOMPÈRE DE CHAMPAGNY – *Notices sur les objets envoyés à l'exposition des produits de l'industrie française*, Paris, Imprimerie impériale, 1806.

- [Dra79] W. DRAPER – « On a new form of spectrometer, and on the distribution of the intensity of light in the spectrum », *Philosophical Magazine* **8** (1879), p. 75–80.
- [Dum28] J.-B. DUMAS – *Traité de chimie appliquée aux arts*, vol. 1, Paris, Béchet, 1828.
- [Dur67] E. DURAND – *Tablettes du directeur d'usines à gaz, contrôle de la qualité du gaz, pouvoir éclairant-épuration*, Paris, Émile Durand, 1867.
- [Dur69] — , *Étalon légal ou mesure type du pouvoir éclairant du gaz d'après les travaux de MM. Dumas et Regnault membres de l'Institut.*, 2 éd., Paris, Émile Durand, 1869.
- [dWAF86] W. DE WIVELESLE ABNEY et E. R. FESTING – « The Bakerian Lecture, Colour Photometry », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **177** (1886), p. 423–456.
- [Ell75] G. E. ELLIS – *Memoir of Sir Benjamin Thompson, Count Rumford, with notices of his Daughter*, London, Macmillan and Company, 1875.
- [Eul70] L. EULER – *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique & de philosophie*, vol. 1, Mietau et Leipsic, Steidel, 1770.
- [Fab] C. FABRY – *Notice sur la vie et les travaux de J. Macé de Lépinay*, Annales de la Faculté des sciences de Marseille.
- [Fab13] — , « A practical solution of the problem of heterochromatic photometry », **8** (1913), p. 302–321.
- [Fab27] — , *Introduction générale à la photométrie*, Paris, Éditions de la Revue d'Optique théorique et instrumentale, 1927.
- [Far32a] M. FARADAY – « V Experimental Researches in Electricity. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **122** (1832), p. 125–162.
- [Far32b] — , « VI. The Bakerian Lecture.-Experimental Researches in Electricity.- Second Series. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **122** (1832), p. 163–194.

- [FF44] H. FIZEAU et L. FOUCAULT – « Recherches sur l'intensité de la lumière émise par le charbon dans l'expérience de Davy », *Annales de chimie et de physique* **11** (1844), p. 370–383.
- [Fle32] P. FLEURY – *Étalons photométriques*, Paris, Éditions de la Revue d'Optique théorique et instrumentale, 1932.
- [Fon79] H. FONTAINE – *Éclairage à l'électricité - Renseignements pratiques*, 2 éd., Paris, Librairie polytechnique J. Baudry, 1879.
- [Fou49a] L. FOUCAULT – « Appareil destiné à rendre constante la lumière émanant d'un charbon placé entre les deux pôles d'une pile », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **28** (1849), p. 68–69.
- [Fou49b] — , « Appareil photo-électrique », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **28** (1849), p. 698–699.
- [Fou55a] — , « Optique appliquée - Du pouvoir éclairant des produits gazeux fournis par la distillation de la tourbe », *Cosmos, Revue encyclopédique des progrès des sciences* **6** (1855), p. 593–597.
- [Fou55b] — , *Rapport sur le pouvoir éclairant des produits gazeux fournis par la distillation de la tourbe*, Paris, Wiesiner, 1855.
- [Fou78] — , *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Paris, Gauthier Villars, 1878, Publié par madame veuve Foucault, sa mère.
- [Fra15] J. FRAUNHOFER – « Bestimmung des Brechungs und Farbenzerstreuungs Vermögens verschiedener Glasarten in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre », *Denkschriften der Bayerischen Akademie der Wissenschaften*, Munich, 1815.
- [Fra23] — , « Détermination du pouvoir réfringent et dispersif de différentes espèces de verre, recherches destinées au perfectionnement des lunettes achromatiques », *Astronomische Abhandlungen herausgegeben von H. C. Schumacher* (1823), p. 13–45.
- [Fra78] B. FRANKLIN – « From Benjamin Franklin to Jan Ingenhousz, 18 March 1774 », *The Papers of Benjamin Franklin*, vol. 21, January 1, 1774, through March 22, 1775, 1978, p. 147–149.

- [Fre66a] A. FRESNEL – « Notes sur l'application du principe d'Huyghens et de la théorie des interférences aux phénomènes de la réflexion et de la diffraction », *Œuvres complètes 1* (1866), p. 201, Extrait du supplément à la traduction française de la chimie de Thomson, 1822.
- [Fre66b] — , « Premier mémoire sur la diffraction de la lumière où l'on examine particulièrement le phénomène des franges colorées que présentent les ombres des corps éclairés par un point lumineux », *Œuvres complètes 1* (1866), p. 9–33, Adressé à l'Académie des sciences le 15 octobre 1815.
- [Fre66c] — , « Théorie de la lumière. première section. », *Œuvres complètes 1* (1866), p. 316.
- [Fre68] — , « Théorie de la lumière. Troisième section. Exposition systématique de la théorie des ondulations et controverse », *Œuvres complètes 2* (1868), p. 8–43, Extrait du supplément à la traduction française de la chimie de Thomson, 1822.
- [Fre70] L. FRESNEL – « œuvres complètes tome 3 », ch. Introduction aux mémoires, notes et fragments d'Augustin Fresnel sur les phares, p. i–lxxv, Paris, Imprimerie impériale, 1870.
- [Fyf24] A. FYFE – « On the Illuminating power of Coal-Gas and Oil-Gas. », *The Edinburgh Philosophical Journal* **11** (1824).
- [Gré94] H. GRÉGOIRE – « Rapport sur l'établissement d'un Conservatoire des arts et métiers. Séance du 8 vendémiaire, l'an III de la République une et indivisible », *Convention nationale. Instruction publique* (1794), p. 9.
- [GT23] K. S. GIBSON et E. P. T. TYNDALL – « Visibility of radiant energy », *Scientific papers of the Bureau of Standards* **19/475** (1923), p. 131–191.
- [Har34] S. HARRIS, WILLIAM – « On some elementary laws of electricity. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **124** (1834), p. 213–245.
- [Har57] — , *Leçons élémentaires d'électricité ou exposition concises des principes généraux d'électricité et de ses applications*, Paris, Leiber et Commelin, 1857, Traduction de l'Anglais par E. Garnault.

- [Har96] C. HARAUCOURT – « La lampe Hefner », *Manuel général de l'instruction primaire : journal hebdomadaire des instituteurs* **32** (1896), p. 386–387.
- [Has97] J.-H. HASSENFRAZ – « Sur la proportion de lumière que produisent differens combustibles, et sur le rapport de clarté obtenue de différentes lampes, en raison de l'huile que l'on emploie », *Annales de chimie* **24** (1797), p. 78–104.
- [Hen05] W. HENRY – « Experiments on the Gases obtained by the destructive Distillation of Wood, Peat, Pit-Coal, Wax, &c. with a View to the Theory of their Combustion, when employed as Sources of artificial Light ; and including Observations on Hydro-Carburets in general, and the Carbonic Oxide », *Journal of Natural Philosophy, Chemistry & the Arts* **11** (1805), p. 65–74.
- [Hen08] — , « Description of an Apparatus for the Analysis of the Compound Inflammable Gases by slow Combustion with Experiments on the Gas from Coal, explaining its Application. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **198** (1808), p. 282–303.
- [Her00a] W. HERSCHEL – « XIII. Investigation of the Powers of the prismatic Colours to heat and illuminate Objects; with Remarks, that prove the different Refrangibility of radiant Heat. To which is added, an Inquiry into the Method of viewing the Sun advantageously, with Telescopes of large Apertures and high magnifying Powers. », *Philosophical Transaction of the Royal Society* **90** (1800), p. 255–283.
- [Her00b] — , « XV. Experiments on the solar, and on the terrestrial Rays that occasion Heat; with a comparative View of the Laws to which Light and Heat, or rather the Rays wich occasion them, are subject, in order to determine wether they are the same or different. », *Philosophical Transaction of the Royal Society* **90** (1800), p. 293–326.
- [Ive12] E. E. IVES – « Studies in the photometry of lights of different colours », *Philosophical Magazine* **26** (1912), p. 149–189.
- [Jam47] J. JAMIN – « Sur la réflexion métallique », *Annales de chimie et de physique* **19** (1847), p. 296–341.

- [Jam70] — , *Petit traité de physique à l'usage des aspirants aux baccalauréats et des candidats aux écoles du gouvernements*, Paris, Gauthier-Villars, 1870.
- [Jam88] — , « Éloge historique de François Arago », *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France* **44** (1888), p. lxxix–cxxxii.
- [JB79] J. JAMIN et E. BOUTY – *Cours de physique de l'École polytechnique*, vol. 3, Paris, Gauthier-Villars, 1879.
- [Jea53] P. JEANNENEY – « Notice sur l'éclairage au gaz », *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse* **25** (1853), no. 121, p. 5–30.
- [Kön84] A. P. KÖNIG – « Ueber den Ort der Schnittpunkte der Intensitätscurven für die drei Grundempfindungen im normalen Auge », *Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft in Berlin* **2/4** (1883 (1884)), p. 24–26.
- [Kön86] — , « Ueber die Beziehung zwischen der Sehschärfe und der Beleuchtungsintensität », *Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft in Berlin* **4/16** (1885 (1886)), p. 79–83.
- [Krü86] H. KRÜSS – *Die elektro-technische Photometrie*, Vienne-Pest-Leipzig, A. Hartleben's Verlag, 1886.
- [Lam59] J.-H. LAMBERT – *Les propriétés remarquables de la route de la lumière par les airs et en général par plusieurs milieux refringens sphériques et concentriques(...)*, La Haye, Nicolas van Daalen, 1759.
- [Lam60a] — , *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbræ.*, Augsburg, Eberhard Klett, 1760.
- [Lam60b] — , *Photometrie ou de la mesure et de la gradation de la lumière, des couleurs et de l'ombre*, Paris, L'Harmattan, 1760, Traduction du latin de J. Boye, J. Couty et M. Saillard.
- [Lam61] — , *Cosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues*, Augsburg, Eberhard Kletts, 1761.
- [Lam72] — , *Beschreibung einer mit Calawischem Wachse ausgemalten Farben-Pyramide, wo die Mischung jeder Farbe aus weiß und drey Grundfarben angeordnet, dargelegt und derselben Berechnung und vielfacher Gebrauch gewiesen wird*, Berlin, 1772.

- [Lam17] W. A. LAMPADIUS – *Beyträge zur Atmosphärologie*, Freiberg, Graz und Gerlach, 1817.
- [Lam40] G. LAMÉ – *Cours de physique de l'École polytechnique*, vol. 2, Paris, Bachelier, 1840.
- [Lan81] S. P. LANGLEY – « Le bolomètre, traduction du mémoire lu en décembre 1880 devant la Société météorologique américaine », *Annales de chimie et de physique* **24** (1881), p. 275–284.
- [Lan83] — , « Experimental determination of Wave-Lengths in the invisible Prismatic Spectrum », *Memoirs of the National Academie of Sciences* **2** (1883), p. 146–163.
- [Lan89] — , « Energy and vision », *Philosophical Magazine* **27** (1889), p. 1–23.
- [Leb01] P. LEBON – *Thermolampes ou poêles qui chauffent ; éclairent avec économie, et offrent, avec plusieurs produits précieux, une force motrice applicable à toutes espèce de machines ; inventés par Philippe Lebon, ingénieur des Ponts et Chaussées*, Paris, Charles Pougens, 1801.
- [Les00] J. LESLIE – « Description d'un hygromètre et d'un photomètre », *Annales de chimie, ou Recueil de mémoires, concernant la chimie et les arts qui en dépendent*. **35** (1800), p. 3–22.
- [Les04] — , *An experimental inquiry into the nature and the propagation of heat*, Edinburgh, 1804.
- [Les13] — , *A short Account of Experiments and Instruments depending on the relations on Air to Heat and Moisture*, Edinburgh, 1813.
- [Les28] — , *Treatises on Various Subjects of Natural and Chemical Philosophy*, Edinburgh, Adam and Charles Black, 1828.
- [Lie07] E. LIEBENTHAL – *Praktische Photometrie*, Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn, 1907.
- [LK94] O. LUMMER et F. KURLBAUM – « Bolometrische Untersuchungen für eine Lichteinheit », *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* **11** (1894), p. 229–238.
- [Mas37] A. P. MASSON – « De l'Induction d'un Courant sur lui-même », *Annales de Chimie et de Physique* **66** (1837), p. 5–36.

- [Mas38a] — , « De l'Action exercée par le Chlorure de Zinc sur l'Accool et des Produits qui en résultent ; », *Annales de Chimie et de Physique* **69** (1838), p. 225–258.
- [Mas38b] — , « Sur le fluide électrique à l'état de diffusion dans le vide. », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **7** (1838), no. 14, p. 671.
- [Mas38c] — , *Théorie physique et mathématique des phénomènes électrodynamiques*, Paris, Crochard, 1838.
- [Mas44] — , « Étude de photométrie électrique ; par M.A. Masson. Premier mémoire. (Extrait par l'auteur). », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **18** (1844), p. 289–292.
- [Mas45] — , « Étude de photométrie électrique, (Premier et deuxième Mémoire communiqués à l'Académie des Sciences dans les séances des 19 février et 5 août 1844.) », *Annales de Chimie et de Physique* **14** (1845), p. 129–195.
- [Mas50] — , « Étude de photométrie électrique ; troisième mémoire. », *Annales de Chimie et de Physique* **30** (1850), p. 5–55.
- [Mas51a] — , « Étude de photométrie électrique ; quatrième et cinquième mémoires. », *Annales de Chimie et de Physique* **31** (1851), p. 295–326.
- [Mas51b] — , *Notice sur les travaux scientifiques de M. A. Masson*, Paris, Imprimerie de L. Martinet, 1851.
- [Mas54] — , *Mémoire sur l'étincelle électrique, ouvrage couronné par la Société hollandaise des sciences*, Harlem, Les héritiers Loosjes, 1854.
- [Mas89] E. MASCART – *Traité d'optique*, vol. 1, Paris, Gauthier-Villars, 1889.
- [MB42] A. MASSON et C. BRÉGUET – « Mémoire sur l'Induction », *Annales de Chimie et de Physique* **4** (1842), p. 129–152.
- [MdL77] J. MACÉ DE LÉPINAY – « La polarisation chromatiques des houppes dans les cristaux à deux axes », *Journal de physique théorique et appliquée* (1877), p. 16–19.

- [MdL80] — , « Recherches expérimentales sur la double réfraction accidentelle », *Annales de chimie et de physique* **19** (1880).
- [MdL83] — , « Sur une méthode pratique pour la comparaison photométrique des sources usuelles diversement colorées. », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **97** (1883), p. 1428–1431.
- [MdLN79] J. MACÉ DE LÉPINAY et W. NICATI – « Recherches sur le daltonisme », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **89** (1879), no. 17, p. 716–717.
- [MdLN80] — , « De la distribution de la lumière dans le spectre solaire (spectre des daltoniens). », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **91** (1880), p. 1078–1080.
- [MdLN81] J. MACÉ DE LÉPINAY et W. NICATI – « Recherche sur la comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre », *Annales de chimie et de physique* **24** (1881), p. 289–337.
- [MdLN82a] — , « Relation entre la loi de Bouguer-Masson et le phénomène de Purkinje. », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **94** (1882), no. 12, p. 785–788.
- [MdLN82b] J. MACÉ DE LÉPINAY et W. NICATI – « Recherche expérimentale sur le phénomène de Purkinje », *Journal de Physique* **1** (1882), p. 33–39.
- [MdLN82c] — , « Recherche sur la comparaison photométrique de sources diversement colorées. », *Association française pour l'avancement des sciences Compte rendu de la 11e session La Rochelle* **11** (1882), p. 223–228.
- [MdLN83a] — , « Recherche sur la comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre. Deuxième mémoire. », *Annales de chimie et de physique* **30** (1883), p. 145–214.
- [MdLN83b] — , « Recherche sur la comparaison photométrique des sources diversement colorées, et en particulier sur la comparaison des différentes parties d'un même spectre », *Journal de Physique* **2** (1883), p. 64–76.

- [Mel50] M. MELLONI – *La Thermochrôse ou la coloration calorifique*, Naples, Imprimerie de Joseph Baron, 1850.
- [Mer34] M. MERSENNE – *Questions inouyes ou recreation des scavans*, Paris, Jacques Villery, 1634.
- [MH34] M. MOREAU-HANOT – « Photométrie des lumières brèves ou variables », *Encyclopédie photométrique*, Quatrième section, Cas extrêmes, Tome IV, Paris, Éditions de la Revue d'Optique théorique et instrumentale, 1934.
- [Min82a] Ministère des Affaires étrangères – *Conférence internationale pour la détermination des unités électriques : 16 octobre – 26 octobre 1882, procès-verbaux*, Paris, Imprimerie nationale, 1882.
- [Min82b] Ministère des postes et des télégraphes – *Congrès international des électriciens, paris, 1881 - comptes rendus des travaux*, Paris, Masson, 1882.
- [Min84] Ministère des Affaires étrangères – *Conférence internationale pour la détermination des unités électriques : deuxième session.*, Paris, Imprimerie nationale, 1884.
- [Min90] Ministère du Commerce et de l'Industrie – *Congrès international des électriciens, paris, 1889 - comptes rendus des travaux*, Paris, Gauthier-Villars, 1890.
- [Moi53] F. MOIGNO – « Académie des sciences, séance du 21 novembre 1853. », *Cosmos, revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des sciences* **3** (1853), p. 692–696.
- [Mor85] W. MORGAN – « Electrical Experiments made in order to ascertain the non conducting Power of a perfect Vacuum, & c. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **75** (1785), p. 272–278.
- [Mur08] W. MURDOCH – « An Account of the Application of the Gas from Coal to economical Purposes. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **198** (1808), p. 124–132.
- [New22] I. NEWTON – *Traité d'optique sur les réflexions, réfractions, inflexions, et les couleurs, de la lumière. Traduction de M. Coste, seconde édition française*, Paris, Montalant, 1722.

- [New59] — , *Principes mathématiques de la philosophie naturelle, Traduction du latin par feu Madame la Marquise du Chastellet, d'après l'édition de 1726*, vol. 1, Paris, Desaint & Saillant, Lambert, 1759.
- [Nic73] W. NICATI – « La paralysie du nerf sympathique cervical, étude clinique », Thèse, Faculté de médecine de Zürich, 1873.
- [Nic75] — , « Recherches sur le mode de distribution des fibres nerveuses dans les nerfs optiques et dans la rétine », Thèse, Faculté de médecine de Paris, 1875.
- [Nic81] W. NICATI – « Travaux du laboratoire de la rue des Fabres à Marseille », ch. De la distribution des fibres nerveuse dans le chiasma des nerfs optiques, Marseille, Barlatier-Feissat, 1881.
- [Nic94] W. NICATI – *échelles visuelles et leurs applications - oxyopimétrie - photométrie - typométrie*, Paris, Société d'éditions scientifiques, 1894.
- [Nic09] — , *Physiologie oculaire, humaine et comparée, normale et pathologique*, Paris, Rheinwald et Schleicher, 1909.
- [NR80] W. NICATI et A. RICHAUD – « Recherches sur la cirrhose biliaire du lapin domestique », *Archives de physiologie normale et pathologique* **7** (1880).
- [Pal88] A. PALAZ – « Les étalons photométriques. L'étalon absolu », *La Lumière Électrique* **27** (1888), no. 13, p. 618–623.
- [Pal89a] — , « Études récentes sur l'unité de lumière et sur les étalons photométriques. », *La Lumière Électrique* **31** (1889), no. 3, p. 109–120.
- [Pal89b] — , « Nouveau modèle de l'étalon Violle », *La Lumière Électrique* **34** (1889), no. 41, p. 51.
- [Pal92] — , *Traité de photométrie industrielle spécialement appliqué à l'éclairage électrique*, Paris, Georges Carré, 1892.
- [Par52] P. PARISOT – « Arc électrique et projection cinématographique », *Atti e rassegna tecnica della Societa degli ingegneri e degli architetti in Torino - nuova serie - Anno 6* (1952), no. 12, p. 400–401.

- [Péc27] E. PÉCLET – *Traité de l'éclairage*, Paris, De Malher, 1827.
- [Pen53] A. PENOT – « Sur le mémoire de M. Jeanneney, relatif à l'éclairage au gaz, présenté par M. le docteur Penot, au nom d'une commission désignée par les comités de chimie et de mécanique, dans la séance du 27 Avril 1853. », *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse* **25** (1853), no. 121, p. 30–96.
- [Pet99] J.-E. PETAVEL – « An experimental research on some standards of light », *Proceedings of the Royal Society of London* **65** (1899), p. 469–503.
- [Poi92] H. POINCARÉ – *Cours de physique mathématique - Théorie mathématique de la lumière*, vol. 2, Paris, Georges Carré, 1892.
- [Pot30] R. POTTER – « An Account of Experiments to determine the quantity of Light reflected by Plane Metallic Specula under different Angles of Incidence. With a Description of the Photometer made use of », *Edinburgh journal of science* **3** (1830), p. 278–288.
- [Pou34] C. POUILLET – « RAPPORT fait par M. Pouillet, au nom d'une Commission spéciale, sur les résultats obtenus par MM. Boscary et Danré dans la fabrication du gaz de résine. », *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale* **35** (1834), p. 71–75.
- [Pou47] — , *Éléments de physique expérimentale et de météorologie*, cinquième édition, vol. 2, Paris, Bechet jeune, 1847.
- [PP39] E. PELOUZE et T. PELOUZE – *Traité de l'éclairage au gaz tiré de la houille, des bitumes, du lignite, de la tourbe, des huiles, des résines, des graisses, etc.*, Paris, Magnin, Blanchard, E. Lacroix, 1839.
- [PP13] E. PÉREIRE et I. PÉREIRE – ch. Première assemblée générale du 7 mars 1857, Paris, Alcan, 1913.
- [Pur25] J.-E. PURKINĚ – *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne*, vol. 2, Berlin, G.Reimer, 1825.
- [Ref78] « Compagnie parisienne d'éclairage et de chauffage par le gaz - Éclairage et chauffage par le gaz - Bibliographie » – Paris, V^e Éthiou-Pérou et A. Klein, 1878.

- [Ref93] « Die Thätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in den Jahren 1891 und 1892 » – *Zeitschrift für Instrumentenkunde* **13** (1893), p. 120.
- [Reg37] V. REGNAULT – « Recherches sur les combustibles minéraux », *Annales des mines* **12** (1837), p. 151–240.
- [Reg51] — , *Cours élémentaire de chimie à l'usage des facultés, des établissements d'enseignement secondaire, des écoles normales et des écoles industrielles*, Bruxelles, Auguste Pagny, 1851.
- [Rie37] P. T. RIESS – « Ueber einige Wirkungen der Reibungselectricität, im Verhältnisse zu ihrer Anhäufung ; », *Annalen der Physik und der Chemie* **40** (1837), p. 321–355.
- [Rit04] J. W. RITTER – « Experiments on light », *Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts (Nicholson's Journal)* **8** (1804), p. 214–216.
- [Rit25a] W. RITCHIE – « On a new photometer, with its application to determine the relative intensities of artificial light, &c.. », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **11** (1825), p. 141–146.
- [Rit25b] — , « On Leslie's photometer and its application to determine the relative Intensity of the Sun's Rays, and the Illuminating Powers of Coal and Oil Gas. », *The Edinburgh Journal of Science* **ii** (1825), p. 321–325.
- [Rit26] — , « On a new photometer, founded on the Principles of Bouguer. », *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **10** (1826), p. 443.
- [Roo93] O. N. ROOD – « On a photometric method which is independent of color », *American journal of sciences* **66/273** (1893), p. 173–176.
- [Roo98] — , « On a a flicker photometer », *Science* **7/179** (1898), p. 757–759.
- [Ros79] J. ROSSETTI – « Sulla temperatura dell'arco voltaico, e delle due estremità polari, positiva e negativa, dei carboni all'atto della produzione della luce elettrica. », *Roma, Atti della reale Accademia dei Lincei* **3** (1879), p. 250–251.

- [Sch68] N. H. SCHILLING – *Traité d'éclairage par le gaz, traduction de l'allemand par Ed. Servier*, Paris, Librairie scientifique, industrielle et agricole, Lacroix, Munich, Rudolph Oldenbourg, 1868.
- [SJ62] C. L. SANDERS et O. C. JONES – « Problem of Realizing the Primary Standard of Light », *Journal of Optical Society of America* **52** (1962), p. 731–746.
- [Smi67] R. SMITH – *Traité d'optique*, Brest, Romain Malassis, 1767, Traduction de l'anglais de Duval le Roy.
- [Soc00] Société technique de l'Industrie du gaz en France – *Congrès international de l'industrie du gaz comptes rendus des travaux*, 1900.
- [TCR94] B. THOMPSON COUNT RUMFORD – « An Account of a Method of measuring the comparative Intensities of the Light emitted by luminous Bodies », *Philosophical Transaction of The Royal Society* **84** (1794), p. 67–106.
- [TCR11a] — , « Recherches sur la lumière qui se manifeste dans la combustion des substances inflammables, lues à la séance de la Première classe de l'Institut, du 14 octobre 1811. », (1811), p. 3–31.
- [TCR11b] — , « Recherches sur les moyens de perfectionner les lampes, avec la description d'une nouvelle lampe portative. », *Bibliothèque britannique* **48** (1811), p. 3–36.
- [Tho75] B. THOMPSON – *The Complete Work of Count Rumford*, vol. 4, Boston, The American Academy of Arts and Sciences, 1875.
- [Tho93a] S. P. THOMPSON – « On the Swinburne-Thompson unit of light », *Proceedings of the International Electrical Congress held in Chicago, 1893* (1893), p. 267.
- [Tho93b] — , « The Electrical Congress of Chicago », *The Electrician* **31** (1893), no. 802, p. 577–579.
- [Tho09] J. THOVERT – « Spectrophotomètres et photométrie des sources colorées », *Le journal de physique théorique et appliquée* **1** (1909), p. 834–843.
- [Tho30] — , « Photométrie physique », *Le journal de physique et le radium* **1** (1930), no. 4, p. 121–125.

- [Tra77] H. TRANNIN – « Mesures des intensités relatives des diverses radiations constitutives des sources lumineuses », Thèse, Faculté des sciences de Lille, 1877.
- [Ver69a] E. VERDET – *Cours de physique professé à l'École polytechnique*, vol. 2, Paris, Victor Masson et fils, 1869.
- [Ver69b] — , *Leçons d'optique physique*, vol. 1, Paris, Victor Masson et fils, 1869.
- [vH67] H. VON HELMHOLTZ – *Optique physiologique*, vol. 1, Paris, Victor Masson, 1867, Traduction de l'allemand par Émile Javal et Nephtali Théodore Klein.
- [Vie69] K. VIERORDT – « Description d'une méthode photométrique pour mesurer les intensités de la lumière colorée ; par M. C. Vierordt, Professeur de Physiologie à Tubingue », *Annales de chimie et de physique* **18** (1869), p. 493–494.
- [Vie71] — , *Die Anwendung des Spectralapparates zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes*, Tübingen, H. Laupp'schen Buchhandlung, 1871.
- [Vio75] J. VIOLLE – « Sur la température du Soleil (réponse à M. Sorret) », *Annales scientifiques de l'É.N.S* **4** (1875), p. 363–370.
- [Vio76] — , « De la température du Soleil », *Journal de physique théorique et appliquée* **5** (1876), p. 169–179.
- [Vio79] — , « Sur la radiation du platine incandescent. », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **88** (1879), no. 4, p. 171–173.
- [Vio83] — , « Sur la radiation de l'argent au moment de sa solidification », *Journal de physique théorique et appliquée* **2** (1883), p. 366–369.
- [Vio84a] — , « Sur l'étalon absolu de lumière », *Annales de chimie et de physique* **3** (1884), p. 373–407.
- [Vio84b] — , « Sur l'étalon absolu de lumière », *Journal de physique théorique et appliquée* **3** (1884), p. 241–250.

- [Vio89] — , *Notice sur les travaux scientifiques de M. Jules Violle, maître de conférences à l'École normale.*, Paris, Gauthier-Villars, 1889.
- [Vio92] — , « Sur la température de l'arc électrique », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **115** (1892), p. 1273–1275.
- [Vio93a] H. VIOLLE, JULES ET MOISSAN – « Sur un four électrique », *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* **115** (1893), p. 550.
- [Vio93b] J. VIOLLE – « Four électrique - Lumière et chaleur de l'arc », *Journal de physique théorique et appliquée* **2** (1893), p. 545–552.
- [Vio93c] — , « Light and Heat of the Electric Arc. », *Proceedings of the International Electrical Congress held in Chicago, 1893* (1893), p. 259–266.
- [Vio01] — , « Photométrie », *Congrès international d'électricité (Paris, 18-25 août 1900). Rapports et procès-verbaux*, 1901, p. 23–45.
- [Vol00] A. VOLTA – « On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **90** (1800), p. 403–431.
- [vS84] W. VON SIEMENS – « Ueber eine Einrichtung zur Darstellung der von der Pariser Conferenz zur Bestimmung der electrischen Einheiten angenommen Lichteinheit », *Annalen der Physik und der Chemie (Wiedemann's Annalen)* **22** (1884), no. 6, p. 304.
- [vS85] — , « Disposition destinée à reproduire l'unité de lumière adoptée par la Conférence parisienne pour l'évaluation des unités électriques », *Journal de physique théorique et appliquée* **4** (1885), p. 533.
- [Wal26] J. W. T. WALSH – *Photometry*, London, Constable, 1926.
- [Wol04] W. H. WOLLASTON – « On certain Chemical Effects of Light », *Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts (Nicholson's Journal)* **8** (1804), p. 293–297.
- [You02] T. YOUNG – « An Account of some Cases of the Production of Colours, not hitherto described », *Philosophical Transactions of the Royal Society* **92** (1802), p. 387–397.

Sources secondaires

- [AGT02] G. AILLAUD, Y. GEORGELIN et H. TACHOIRE – *Marseille, 2600 ans de découvertes scientifiques*, vol. 3, Découvreurs et découvertes, Aix en Provence, Publications de l'Université de Provence, 2002.
- [AM76] P. E. ARIOTTI et F. J. MARCOLONGO – « The Law of Illumination before Bouguer (1729) : Statement, Restatements and Demonstration », *Annals of Science* **33** (1976), p. 331–340.
- [And03] A. ANDERS – « Tracking down the origin of arc plasma Science-II. Early continuous discharges », *IEEE Transactions on Plasma Science* **31** (2003), p. 1060.
- [Bar13] H. BARRÉ – « tome XI : Biographies », Les Bouches du Rhône, encyclopédie départementale (P. Masson, éd.), Marseille, 1913, p. 309.
- [Bel89] B. BELHOSTE – « Les caractères généraux de l'enseignement secondaire scientifique : de la fin de l'Ancien Régime à la Première Guerre mondiale », *Histoire de l'éducation* (1989), no. 41, Histoire des enseignements scientifiques (janvier 1989), p. 3–45.
- [Bel94] — , « Bruno Belhoste, Francine Masson, Antoine Picon, Le Paris des polytechniciens : des ingénieurs dans la ville (1794-1994) », ch. Les polytechniciens dans la vie intellectuelle parisienne au XIX^e siècle, p. 53–59, Action artistique de la Ville de Paris, 1994.
- [BJ04] P. BERNARD et L. JACQUELINE – *L'aube de la physique de l'énergie, Helmholtz, rénovateur de la dynamique*, Paris, Vuibert, 2004.
- [Blo90] C. BLONDEL – « Négociations entre savants, industriels et administrateurs : les premiers congrès internationaux d'électricité », *Relations internationales* **62** (1990), no. Les congrès scientifiques internationaux, p. 171–182.

- [Blo98] — , « Les physiciens français et l'électricité industrielle à la fin du XIX^e siècle », *Physis : Rivista internazionale di storia della scienza* **35** (1998), no. 2, p. 245–271.
- [Boi01] G. BOISTEL – « L'astronomie nautique au XVIII^e siècle en France : tables de la Lune et longitudes en mer », Thèse, Université de Nantes, 2001.
- [Boi10] G. BOISTEL – « Pierre Bouguer, commissaire pour la marine et expert pour les longitudes : un opposant au développement de l'horlogerie de marine au xviii^e siècle », *Revue d'histoire des sciences* **63** (2010), p. 121–159.
- [CD89] N.-E. CADIAT et L. DUBOST – *Traité pratique d'électricité industrielle*, 3 éd., Paris, Librairie polytechnique, Baudry et Cie, 1889.
- [Cha04] A. CHAPPERT – *L'édification au XIX^e siècle d'une science du phénomène lumineux*, Paris, Librairie philosophique J. Vrin, 2004.
- [Cha20] J.-L. CHAPPEY – *La Révolution des sciences 1789 ou le sacre des savants*, Paris, La librairie Vuibert, 2020.
- [Cro67] M. CROWLAND – *The Society of Arcueil. A view of French Science at the time of Napoléon I*, London, Heinemann, 1967.
- [CS21] C. COSTE et C. SILVANT – « Les frères Péreire, financiers Saint-simoniens », *L'économie politique* **89** (2021), no. 1, p. 99–112.
- [CTV83] P. CARRÉ, G. TISSANDIER et H. VALETTE – « L'exposition internationale d'électricité de 1881 à travers quelques textes », *Bulletin d'histoire de l'électricité* (1983), no. 2, p. 63–84.
- [Cue31] V. CUENOD – « Nécrologie de William Nicati », *Revue médicale de la Suisse romande* **51** (1931), p. 317–320.
- [Dai97] J.-G. DAIGLE – *La culture en partage. Grenoble et son élite au 19^e siècle*, Presse universitaires de Grenoble, 1997.
- [Dar12] O. DARRIGOL – *A history of optics from greek antiquity to the nineteenth century*, Oxford, Oxford University Press, 2012.
- [Dau87] M. DAUMAS – *Arago 1786-1853 la jeunesse de la science*, Paris, Belin, 1987.

- [DD89] J. DHOMBRES et N. DHOMBRES – *Naissance d'un nouveau pouvoir, sciences et savants en France (1793-1824)*, Paris, Payot, 1989.
- [DD05] C. DOUYÈRE-DEMEULENAÈRE – *Expositions publiques des produits de l'industrie française avant 1850, répertoire méthodique*, Paris, Centre historique des archives nationales, 2005.
- [D'E17] R. D'ENFERT – « École du peuple et scolarisation post-élémentaire », *Revue d'histoire du XIXe siècle* **55** (2017), no. 2, p. 43–57.
- [Del00] S. DELATTRE – *Les douze heures noires. La nuit à Paris au XIX^e siècle*, Paris, Albin Michel, 2000.
- [Des81] S. DESAINS – *Notice historique sur le Pavé de Paris*, Paris, Charles de Nourgues frères, 1881.
- [dF] W. DE FONVIELLE – *La jeunesse d'un grand savant républicain*, Paris, Émile Gaillard.
- [dF95] L. C. DE FRANQUEVILLE – *Le premier siècle de l'Institut de France*, Paris, Rotschild, 1895.
- [DiL01] D. L. DiLAURA – *Photometry, or, On the measure and gradations of light, colors, and shade : Translation from the Latin of Photometria, sive, De mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae, Johann Heinrich Lambert.*, The Illuminating Engineering Society of North America, 2001.
- [DiL05] — , « Light's measure : A history of industrial photometry to 1909 », *Leukos* (2005), no. 1/3, p. 75–149.
- [DiL06] — , *A history of light and lighting - in celebration of the centenary of the illuminating engineering society of north america*, The Illuminating Engineering Society of North America, 2006.
- [Fabsd] C. FABRY – « Notice sur les travaux et la vie de Jules Macé de Lépinay », *Annales de la Faculté des Sciences de Marseille*, vol. 15, s.d.
- [Fal67] M. E. FALKUS – « The British Gas Industry before 1850 », *The Economic History Review* **20** (1967), no. 3, p. 494–508.

- [Fal82] — , « The Early Development of the British Gas Industry, 1790-1815 », *The Economic History Review* **35** (1982), no. 2, p. 217–234.
- [Fau85] D. FAUQUE – « Alexis-Marie Rochon, savant astronome et opticien (1741-1817) », *Revue d'histoire des sciences* **38** (1985), no. 1, p. 3–36.
- [Fau01] — , « Du bon usage de l'éloge : Cas de celui de Pierre Bouguer », *Revue d'histoire des sciences* **53** (2001), no. 3, p. 351–382.
- [Fau10] — , « Pierre Bouguer, figure emblématique ou savant singulier », *Revue d'histoire des sciences* **63** (2010), p. 5–21.
- [Fig70] L. FIGUIER – *Les Merveilles de la science*, vol. 4, Paris, Furne, Jouvot, 1870.
- [For80] J. H. S. FORMEY – « éloge de M. Lambert », *Berlin, Nouveaux mémoires de l'Académie des sciences et Belles lettres de Berlin, année 1778* (1780), p. 72–91.
- [FP15] C. FONTANON et L. PETITGIRARD – « Du Système métrique au Laboratoire d'essais : le Cnam et la Métrologie nationale (1795-1960). », *Cahiers d'histoire du Cnam* **3** (2015), no. 1, p. 13–37.
- [Fre20] J.-B. FRESSOZ – « Une histoire matérielle de la lumière », *Face à la puissance, une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel* (F. Jarrige et A. Vrignon, eds.), Paris, La Découverte, 2020, p. 84–99.
- [FWS20] R. FOX, G. WEISZ et R. SLOTTEN – « Volume 8 : Modern Science in National, Transnational, and Global Context - France During the Long Nineteenth Century », *The Cambridge history of science*, Cambridge University Press, 2020.
- [GBa12] E. O. GÖBEL, W. BUCK et AL. – « PTR/PTB : 125 Jahre metrologische Forschung », *PTB Mitteilungen Fachjournal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* **2** (2012).
- [GdF58] J.-E. GRANDJEAN DE FOUCHY – « Éloge de M. Bouguer, 1729 », *Paris, Histoire de l'Académie royale des sciences* (1758), p. 127–136.
- [Gré89] O. GRÉARD – *Éducation et instruction, enseignement secondaire II*, 2 éd., Paris, Hachette, 1889.

- [Hau02] M. HAU – « Institutions patronales et coopération à Mulhouse au XIX^e siècle », *Villes et districts industriels en Europe occidentale (XVII^e-XX^e siècle)* (J.-F. Eck et M. Lescure, éd.), Presses universitaires François-Rabelais, 2002, p. 149–159.
- [Jam08] V. JAMET – « Discours de réception de M. Victor Jamet, membre de la classe des sciences », *Mémoires de l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Marseille* (1908).
- [Joh01] S. F. JOHNSTON – *A history of light and colour measurement : Science in the shadows*, Bristol, Institute of Physics Publishing, 2001.
- [Joy48] L. JOYIGNOT – « Un grand savant bourguignon du XIX^e siècle : Antoine Masson », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **1** (1948), no. 4, p. 337–350.
- [Lam64] R. LAMONTAGNE – *La vie et l'œuvre de Pierre Bouguer*, Montréal, Presses universitaires de Montréal, Paris, Presses Universitaires de France, 1964.
- [Lan09] P. LANGEVIN – « L'oeuvre de Mascart : Leçon d'ouverture du cours de physique générale et expérimentale au Collège de France », *La Revue du mois* **8** (juil.-déc. 1909), p. 385–406.
- [LC11] H. LE CHATELIER – « Victor Regnault Discours prononcé à l'occasion du centenaire de la naissance de l'illustre physicien, dans la cérémonie commémorative du 18 décembre 1910, au Collège de France. », *Annales de l'École des mines* **19** (1911), p. 49–63.
- [Lec08] F. LECLERCQ – « Jean-Baptiste Biot(1774-1862) et la théorie corpusculaire de la lumière », Thèse, Université des sciences et technologies de Lille, 2008.
- [Lec11] — , « Biot, la polarisation chromatique et la théorie des accès », *Revue d'histoire des sciences* **64** (2011), no. 1, p. 121–156.
- [Lec13] F. LECLERCQ – « Arago, Biot et Fresnel expliquent la polarisation rotatoire », *Revue d'histoire des sciences* **66** (2013), no. 2, p. 395–416.
- [Leq08] J. LEQUEUX – *François Arago Un savant généreux Physique et astronomie au XIX^e siècle*, Paris EDP Sciences Observatoire de Paris, 2008.

- [Lev52] P.-J. LEVOT – *Biographie bretonne*, Vannes, Cauderan, Paris, Dumoulin, 1852.
- [Lev00] T. LEVITT – « Editing out caloric : Fresnel, Arago and the meaning of light », *BJHS* **33** (2000), p. 49–65.
- [Lev09] — , *The Shadow of Enlightenment. Optical and Political Transparency in France, 1789-1848*, Oxford, Oxford University Press, 2009.
- [Lev13] — , *A Short, Bright Flash Augustin Fresnel and the birth of the modern Lighthouse*, New York, W. W. Norton, 2013.
- [Mah66a] G. MAHEU – « Bibliographie de Pierre Bouguer (1698-1758) », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **19** (1966), no. 3, p. 193–205.
- [Mah66b] — , « La vie scientifique au milieu du XVIII^e siècle : Introduction à la publication des lettres de Bouguer à Euler. », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **19** (1966), no. 3, p. 206–224.
- [Mai92] A. MAIRE – *Catalogue des thèses de sciences soutenues en France de 1810 à 1890 inclusivement*, Paris, H. Welter, 1892.
- [Mar99] J.-L. MARIGNIER – « Niépce. L'invention de la photographie », *Un savant, une époque*, Jean Dhombres (dir.), Paris, Belin, 1999.
- [Mau64] L.-F. A. MAURY – *Les académies d'autrefois - L'ancienne Académie des sciences*, Paris, Didier, 1864.
- [May10] A. MAYRARGUE – « De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres », *Revue d'histoire des sciences* **63** (2010), no. 1, p. 67–91.
- [MG10] G. MASSARD-GUILBAUD – *Histoire de la pollution industrielle. France, 1789-1914*, Paris, Éditions de l'EHESS, 2010.
- [Mic19] L.-G. MICHAUD – *Biographie universelle ancienne et moderne*, vol. 23, 1819.
- [ML17] S. MARTINA et R. LAURENT – « Pour une histoire du Bureau des longitudes (1795-1932) », *Histoire des institutions scientifiques*, Nancy, Presses universitaires de Nancy, Éditions universitaires de Lorraine, 2017.

- [Mor65] J.-E. MORÈRE – « La photométrie : les sources de l’essai d’optique sur la gradation de la lumière de Pierre Bouguer, 1729 », *Revue d’histoire des sciences et de leurs applications* **18** (1965), no. 4, p. 337–384.
- [Ott99] F. OTT – « La Société industrielle de Mulhouse (1826-1876) : ses hommes, son action, ses réseaux », Thèse, EHSS, 1999.
- [Pié51] H. PIÉRON – *Vocabulaire de la psychologie*, Paris, Presses Universitaires de France, 1951.
- [Pic79] C. PICKERING, EDWARD – « Photometric observations by Edward C. Pickering, Director », *Annals of the Astronomical Observatory of the Harvard College* **11** (1879), p. 1–8.
- [Pra02] M. PRANZA – *Newton*, Paris, Les belles lettres, 2002.
- [Ras89] A. RASMUSSEN – « Les Congrès internationaux liés aux Expositions universelles de Paris (1867-1900) », *Mil neuf cent* **7** (1989), no. Les congrès lieux de l’échange intellectuel 1850-1914, p. 23–44.
- [Ras90] — , « Jalons pour une histoire des congrès internationaux au XIX^e siècle : Régulation scientifique et propagande intellectuelle », *Relations internationales* **62** (1990), no. Les congrès scientifiques internationaux, p. 115–133.
- [Ras95] — , « L’internationale scientifique (1890-1914) », Thèse, Paris, EHESS, 1995.
- [Rec14] S. RECULIN – « L’illumination publique dans le royaume de France : un instrument de l’ordre public ? », *Ordonner et régénérer la ville : entre modernités et révolutions. Actes du 137^e Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, « Composition(s) urbaine(s) », Tours, 2012*, Paris, éditions du CTHS, 2014.
- [Rec17] — , « ”Le règne de la nuit désormais va finir”. L’invention et la diffusion de l’éclairage public dans le royaume de France (1697-1789) », Thèse, Université Charles de Gaulle - Lille III, 2017.
- [Ref30] « Essai d’optique sur la gradation de la lumière » – *Le Journal des Scavans*, 1730, p. 67–73.
- [Ref24] « L’Industrie du gaz en France, Cinquantenaire de la Société technique de l’industriedu gaz » – Société technique de l’industrie du gaz, 1924.

- [Rey08] C.-R. REYNEAU – *Analyse démontrée ou la méthode de résoudre les problèmes des mathématiques*, Paris, Jacques Quillau, 1708.
- [Rey87] R. REY – « Naissance et développement du vitalisme en France de la deuxième moitié du dix-huitième siècle à la fin du Premier Empire », Thèse, Université Paris 1, 1987.
- [Ros78] J. ROSMORDUC – « J. H. Lambert, les propriétés remarquables de la Route de la lumière, par les airs et en général par plusieurs milieux réfringens sphériques et concentriques, avec la solution des problèmes qui y ont rapport...; texte rév. par mme P. Radelet, préf. de D. Speiser avec la collab. de M. L. Boissy. », *Paris, Revue d'histoire des sciences* **31** (1978), no. 3, p. 285–286.
- [Ros83] — , *La polarisation rotatoire naturelle, de la structure de la lumière à celle des molécules*, Brest Université de Bretagne occidentale - Librairie scientifique et technique A. Blanchard, 1983.
- [Ros84] — , « Une méthode optique sur l'analyse de la structure de la lumière au XIXe siècle », *Publications des séminaires de mathématiques et informatique de Rennes* **2** (1984), p. 1–18.
- [Rot07] D. ROTHBARTS – *Philosophical instruments Minds and Tools at Work*, University of Illinois Press, 2007.
- [RS15] K. RAJ et H. O. SIBUM – « 2. Modernité et globalisation », *Histoire des sciences et des savoirs*, Paris, Seuil, 2015.
- [SC93] M. SAILLARD et Y. CORTIAL – « Calcul de la courbe d'efficacité lumineuse spectrale de l'œil effectué à partir des mesures des intensités des différentes couleurs du spectre solaire de Josef Fraunhofer (1817) », *Revue d'histoire des sciences* **46** (1993), no. 2-3, p. 259–272.
- [SG90] B. SCHROEDER-GUDEHUS – « Les congrès scientifiques et la politique de coopération internationale des académies des sciences », *Relations internationales* **62** (1990), no. Les congrès scientifiques internationaux, p. 135–148.
- [SG18] — , « Émergence des congrès scientifiques internationaux au 19e siècle », *Dossier Recherche et rencontre*, 2018.
- [Tho92] A. THOMAS – *La société philomathique de Paris et deux siècles d'histoire de la science en France : Colloque du bicentenaire de*

la société philomathique de Paris, Paris, Presses universitaires de France, 1992.

- [TLT23] L. THIBOS, K. LENNER et C. THIBOS – « Carl Bergmann (1814–1865) and the discovery of the anatomical site in the retina where vision is initiated », *Journal of the History of the Neurosciences* (2023).
- [Wal12] C. D. WALCOTT – « Biographical memoir of Samuel Pierpont Langley, 1834-1906 », *National Academy of Sciences* (1912).
- [Wal58] J. W. T. WALSH – « Was Pierre Bouguer the “Father of Photometry” ? », *American Journal of Physics* **26** (1958), no. 6, p. 405–406.
- [Wil99] J.-P. WILLIOT – *Naissance d’un service public : Le gaz à Paris au XIX^e siècle*, Paris, Éditions Rive Droite, 1999.
- [WP05] J.-P. WILLIOT et S. PAQUIER – « Origine et diffusion d’une technologie nouvelle au XIX^e siècle in L’industrie du gaz en Europe aux XIX^e et XX^e siècles. L’innovation entre marchés privés et collectivités publiques », *Euroclio* (2005), no. 20.

Ouvrages généraux

- [Bia98] P. BIANCO – *De la pile de Volta à la conquête de l'espace. Deux siècles d'électrochimie 1799-1999*, Presses universitaires de Provence, 1998.
- [Blo94] C. BLONDEL – *Histoire de l'électricité*, Paris, Pocket, 1994, Explora, Cité des Sciences et de l'Industrie.
- [Bou34] H. BOUASSE – *Optique et photométrie dites géométriques*, Paris, Librairie Delagrave, 1934, Bibliothèque scientifique de l'ingénieur et du physicien.
- [Bru54] G. BRUHAT – *Cours de physique générale, Optique*, quatrième éd., Paris, Masson, 1954.
- [BVL18] B. BENSAUDE VINCENT et S. LOEVE – *Carbone Ses vies, ses œuvres*, Paris, Seuil, 2018.
- [BVS95] B. BENSAUDE VINCENT et I. STENGERS – *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte, 1995.
- [DA70] G. DÉVORÉ et R. ANNEQUIN – *Cours de physique : Optique II*, quatrième éd., Paris, Vuibert, 1970.
- [DB51] L. DE BROGLIE – *Savants et découvertes*, Paris, Albin Michel, 1951.
- [dWL79] L. DE WECKER et E. LANDOLT – *Traité complet d'ophtalmologie*, vol. 1, Paris, Delahaye, 1879.
- [Kay00] H. KAYSER – *Handbuch der Spectroscopie*, vol. 1, Leipzig, Hirzel, 1900.
- [LG72] Y. LE GRAND – *Optique physiologique*, 2ème éd., vol. 2 Lumière et couleurs, Paris, Masson et Cie, 1972.

-
- [Ron56] V. RONCHI – *Histoire de la lumière*, Paris, Armand Colin, 1956, Traduction de l'italien de *Storia della luce* par Juliette Taton.
- [Ros85] J. ROSMORDUC – *Une histoire de la physique et de la chimie De Thalès à Einstein*, Paris, Éditions du Seuil, 1985.
- [Tat61] R. TATON – *Histoire générale des sciences*, vol. 3-1, Presses universitaires de France, 1961, La Science contemporaine, Le XIX^e siècle.
- [WS82] G. WYSECKI et W. S. STILES – *Color science*, 2nd éd., John Wiley and Sons, 1982.

Table des figures

1.1	Portrait de Pierre Bouguer	21
1.2	Loi du carré inverse de la distance selon Boulliau	29
1.3	Illustration de la loi des distances	29
1.4	Expérience d'égalisation visuelle	31
1.5	Photomètre de Pierre Bouguer. Traité, fig.1, planche I.	33
1.6	Photomètre de Pierre Bouguer. Traité, fig.2, planche I.	34
1.7	La transmission de la lumière dans les milieux diaphanes	36
1.8	Gradulucique d'un milieu diaphane, d'après Bouguer	37
1.9	Les graduluciques de deux corps transparents	39
1.10	Expérience de Bouguer sur le seuil différentiel de sensation	40
1.11	Loi de l'obliquité, d'après J.H. Lambert	48
1.12	Pupillomètre de Lambert	50
1.13	Appareil de Rumford appelé aussi photomètre de Lambert	53
1.14	Photomètre de Rumford, vue de dessus.	54
1.15	Numératrice des aspérités d'après Bouguer	56
2.1	Bec d'Argand. D'après Pécelet, <i>Traité de l'éclairage</i>	78
2.2	Luminosité du ciel mesurée par l'appareil de Horner	92
2.3	Le vernier gradué du photomètre de Lampadius	93
2.4	Photomètre de Leslie	96
2.5	Expérience d'Arago	105
2.6	Lunette polariscope d'Arago	111
2.7	Champ observé à travers la lunette polariscope d'Arago	112
2.8	Le polarimètre d'Arago	114
2.9	Le photomètre d'Arago	116
2.10	Photomètre d'Arago : détail	117

2.11	L'appareil photométrique d'Arago	123
2.12	Photométries stellaires obtenues par Arago et Laugier	124
3.1	Illuminating power of Coal-Gas and Oil-Gas	139
3.2	Photomètre de Ritchie	143
3.3	Photomètre de Ritchie selon les principes de Bouguer	147
3.4	Résultats de l'École des mineurs de Saint-Étienne	155
3.5	Pouvoirs éclairants du gaz de résine et du gaz de houille	158
3.6	État de l'éclairage public à Paris, 1837	159
3.7	Schéma de principe du photomètre de Foucault.	169
3.8	Plan d'une partie de l'usine d'Eger, tiré de N.H. Schilling	178
3.9	Montage de Masson avec l'œuf électrique dans l' <i>extra-courant</i>	195
3.10	Les disques de Masson	196
3.11	Le photomètre électrique de Masson	198
3.12	Masson, Étude de photométrie électrique	200
3.13	Masson, Étude de photométrie électrique, tab. XV	202
4.1	Portrait de Jules Macé de Lépinay	214
4.2	Portrait de William Nicati	216
4.3	Intensité de la sensation chez les sujets daltoniens	220
4.4	Raies d'absorption du spectre solaire, par Fraunhofer	224
4.5	Sensation fonction de l'intensité objective (Helmholtz)	228
4.6	Motif utilisé par Macé de Lépinay et Nicati	231
4.7	Réglage de la quantité de lumière (Macé de Lépinay, Nicati)	233
4.8	C.e.a. pour trois longueurs d'onde de l'intensité maximale	235
4.9	C.e.a. pour différentes acuités visuelles	236
4.10	C.e.a. fonction de la longueur d'onde pour différentes acuités	237
4.11	Acuité visuelle en fonction de l'intensité lumineuse objective	239
4.12	Valeurs de A et de n dans les différentes régions du spectre	241
4.13	La tige ombrante et son support	242
4.14	Valeurs des c.e.c. pour différentes hauteurs	245
4.15	« Pouvoir éclairant » dans le spectre solaire	247
4.16	Rapport $\frac{C.e.a.}{C.e.c.}$ pour différents éclairages	248
4.17	Variations de A (clartés égales) et B (acuités égales)	249
4.18	intensités pour différents observateurs et différentes méthodes	251

4.19	$V(\lambda)$: données NBS, Macé de Lépinay et Nicati	259
4.20	Lumière solaire et lampe Carcel (Crova)	263
5.1	Règlement du Laboratoire central d'électricité	275
5.2	Données de Zöllner, Conférence unités électriques 1882	278
5.3	Radiation émise pendant la solidification de l'argent (Violle)	286
5.4	Profil de la température pendant la solidification de l'argent	287
5.5	Réalisation de l'étalon Violle	289
5.6	Appareil de Petavel pour la fusion du platine	298
5.7	Résultats de Petavel dans les conditions normales	300
5.8	Four électrique de Violle et Moissan	308
5.9	L'arc-étalon de Blondel	312
5.10	Essais des crayons de deux constructeurs	313
5.11	Bougie de Blondel	323
5.12	Éclairement sur l'axe d'une lentille (Féry)	324
5.13	Grandeurs photométriques et leurs unités (Blondel)	327
5.14	Unités photométriques et symboles proposés par Blondel	332
5.15	Mesure de l'intensité moyenne sphérique (Blondel)	335
5.16	Schéma de principe du Lumen-mètre de Blondel	336
A.1	Angle solide	350
A.2	Angle solide élémentaire	351
A.3	Intensité d'une source ponctuelle dans une direction donnée	352
A.4	Éclairement autour d'un point M	353
A.5	Luminance (éclat intrinsèque)	354
B.1	Rhomboedre	358
B.2	Faisceaux ordinaire et extraordinaire (section principale)	358
B.3	Biprisme de Rochon. Trajet des faisceaux	363
B.4	Micromètre de Rochon	364
B.5	Lunette de Rochon, double image d'un objet éloigné	365
C.1	Expérience des deux rhomboèdres	374
C.2	Pile de glaces, valeurs de Brewster	380
C.3	Modification des plans de polarisation (Fresnel)	382

C.4	Polarisation rotatoire	385
C.5	Prisme de Nicol, trajet des rayons	386
D.1	Loi du 7 messidor An III, articles I à V.	388
D.2	Loi du 7 messidor An III, articles VI à XI.	390
D.3	PV de la nomination d'Arago à l'Observatoire	391
E.1	Etats de service d'Antoine Philibert Masson	394
E.2	Etats de service d'Antoine Philibert Masson	395
E.3	États de service de Jules Macé de Lépinay	396
E.4	États de service de Jules Violle	397
E.5	États de service d'André Blondel	398
E.6	États de service d'André Blondel	399
E.7	États de service d'André Blondel	400
F.1	L'étalon Violle sur le banc de Deleuil	401
F.2	Modèle simplifié de l'étalon Violle	402
F.3	Reproduction de l'étalon Violle par Petavel	403

Table des matières

Remerciements	3
Sommaire	5
Abréviations utilisées	7
Mesurer la lumière	8
1 Un <i>nouvel Art</i>	21
1.1 Pierre Bouguer : inventer un <i>nouvel art</i>	22
1.2 Jean-Henri Lambert, le géomètre	42
1.3 Thompson - Premier photomètre pratique	51
1.4 Conclusion	56
2 Des sciences en maturation	59
2.1 Nouvelles institutions pour une jeunesse scientifique	61
2.2 De part et d'autre du spectre visible	67
2.3 Intensité lumineuse et force vive	69
2.4 Photométrie pratique : l'éclairage des côtes françaises	77
2.5 Photométrie atmosphérique	88
2.6 François Arago et le photomètre à polarisation	100
2.7 Photométrie astronomique	120
3 Nouvelles lumières	129
3.1 Oil gas vs coal gas	133
3.2 Le prix de la lumière	149
3.3 Expertises et normalisation	164

3.4	Étincelle électrique - arc voltaïque	182
3.5	Antoine-Philibert Masson - Photométrie électrique	189
4	Photométrie des sources colorées	207
4.1	La photométrie hétérochrome	210
4.2	Deux savants : Macé de Lépinay-Nicati	214
4.3	Comparaison photométrique des parties d'un même spectre . .	220
4.4	Méthode de l'acuité visuelle	230
4.5	La loi de Bouguer-Masson et l'effet Purkyně	239
4.6	Méthode de l'égalité des ombres	241
4.7	Confrontation des deux méthodes	247
4.8	Des données pour l'optique physiologique	253
4.9	Spectrophotométrie	260
4.10	Conclusion	265
5	Étalons de lumière et grandeurs photométriques	269
5.1	Instances nationales et congrès internationaux	272
5.2	Le déclin des étalons à flamme	277
5.3	Étalon Violle	281
5.4	L'arc étalon de Blondel	302
5.5	Le paradoxe du projecteur	317
5.6	Grandeurs photométriques - Le système de Blondel	325
5.7	1900 : la Commission internationale de la photométrie	336
	Conclusion	341
A	Notions fondamentales de la photométrie	349
A.1	Sources lumineuses	349
A.2	Grandeurs géométriques d'un faisceau lumineux	350
A.2.1	Angle solide	350
A.2.2	Angle solide élémentaire	351
A.3	Intensités énergétiques	351
A.3.1	Flux lumineux	351
A.3.2	Intensité d'une source ponctuelle	352
A.3.3	Éclairement	353

A.3.4	Luminance (éclat intrinsèque)	354
B	Cristaux biréfringents - Double réfraction	357
B.1	Le spath d’Islande	357
B.2	Double réfraction	358
B.3	L’expérience <i>miraculeuse</i> de Huygens	360
B.4	Micromètre à double image	362
B.4.1	La lunette de Rochon	364
C	Polarisation de la lumière	369
C.1	Pôles	369
C.2	Étienne Louis Malus et la loi du <i>cosinus carré</i>	372
C.3	Sur une propriété de la lumière réfléchie	375
C.4	Lumière transmise - Pile de glaces	377
C.5	Polarisation <i>colorée</i> - Polarisation rotatoire	380
C.6	Premier polariseur pratique : le prisme de Nicol	385
D	Le Bureau des longitudes	387
D.1	Longitudes et Connaissance des tems	387
D.2	Arago au Bureau des longitudes	390
E	États de service des physiciens	393
F	Étalon Violle	401
F.1	L’étalon Violle	401
F.2	La réalisation de Petavel	403
	Bibliographie	404
	Table des figures	440
	Table des matières	444
	Index	447

Index

A

Académie des sciences, 73, 79, 88, 100, 102, 129, 166, 167, 174, 189, 191
Académie royale des sciences, 22, 61, 93
Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres de Berlin, 43
Acuité visuelle, 209, 216, 218, 222, 226, 230, 255
Adams William Grylls (1836-1915), 306
Aguilon François d' (1567-1617), 28
Aldini Giovanni (1762-1834), 87
Allard Émile (1818-1892), 311
American Institute of Electrical Engineers, 309, 315, 337
Ampère André-Marie (1775-1836), 16, 191
Anders André, 183
Ango Pierre (1640-1694), 72
Annalen der Physik und der Physikalischen Chemie, 89
Annales de chimie et de physique, 65, 149, 151, 170, 176, 189
Arago Dominique François (1786-1853), 11, 14, 16, 17, 42, 60, 61, 65, 73, 80, 81, 83, 88, 89, 99–102, 104–114, 116–118, 120–123, 125–127, 129, 150, 157, 165, 168, 174, 191, 269
Arc voltaïque, 130

Arc-étalon, 311
Argand Ami (ou Aimé) (1750-1803), 54, 78, 82, 89, 105, 141
Argand bec d', 159
Ariotti Piero E., 28
Armonville Jean-Regnault (1786-1837), 88
Association britannique pour l'avancement des sciences (BA), 211, 272, 291, 301, 303, 306
Association française pour l'avancement des sciences, 325
Audouin Paul Marie Eugène (1835-1920), 174, 176
Auer Freiherr von Welsbach Carl (1858-1929), 340
Auzout Adrien (1622-1691), 26

B

Babinet Jacques (1794-1872), 88, 121, 166, 168, 170, 204
Bailly de Merlieux Charles François (1800-1862), 66
Bailly Jean Sylvain (1736-1793), 61, 66, 103
Banks Joseph Sir (1743-1820), 52
Barral Jean-Augustin (1819-1884), 102
Bartholin Rasmus (1625-1688), 104
Becquerel Antoine (1788-1878), 184
Becquerel Edmond (1820-1891), 184, 261
Becquey Louis (1760-1849), 82

- Beer August (1825-1863), 39
 Belhoste Bruno, 16, 17
 Bengel bec, 175
 Bensaude-Vincent Bernadette, 133, 136
 Bérard Henri Étienne Paul (1836-1921), 174, 176
 Bérard Jacques-Étienne (1789-1869), 60, 67, 69, 151, 152, 155, 174
 Berger Paul Georges Louis (1834-1910), 211
 Bergmann Carl Georg Lucas Christian (1814-1865), 213
 Bergon Louis-Marcellin (1822-1911), 274
 Bernard Claude (1813-1878), 216
 Bernouilli Daniel (1700-1782), 43
 Berthelot Marcellin (1827-1907), 309
 Berthollet Claude-Louis (1748-1822), 17, 60, 65, 67, 69
 Bertin-Mourot Augustin (1818-1884), 214
 Biot Jean-Baptiste (1774-1862), 16, 61, 65, 69, 70, 101, 106, 108, 109, 127
 Blavier Édouard Ernest (1826-1887), 274
 Blondel André (1863-1938), 13, 14, 18, 271, 302, 304, 305, 309, 311, 312, 315, 318, 320-322, 324, 325, 328-331, 333-335, 338
 Blondel Christine, 210, 273
 Boistel Guy, 24, 103
 Bordier-Marcet Isaac-Ami (1768-1835), 82, 85, 87, 89
 Bordin, Charles-Laurent (1761-1835), 283
 Bouasse Henri (1866-1953), 224, 253, 255
 Bougie de l'étoile, 160
 Bougie décimale bd, 309, 328
 Bouguer Pierre (1698-1758), 11, 13, 14, 16, 21-24, 26, 27, 32, 33, 35-39, 41, 42, 45, 47, 49, 51, 53, 56, 60, 69, 75, 76, 79, 84, 87, 89, 93, 98, 104, 118, 119, 125, 132, 142, 145, 152, 159, 196, 204, 224, 239, 320, 326
 Boulliau Ismaël (1605-1694) ou Bullialdus, 28
 Boulton Matthew (1728-1809), 134
 Bourdelles Jean-Baptiste dit Léon (1838-1899), 320
 Boutron Charlard Antoine François (1796- 1879), 165
 Bouty Edmond (1846-1922), 232
 Bouvard Alexis (1767-1843), 102, 106
 Bouvard Eugène (1812-1879), 120
 Braconnot Henri (1780-1855), 160
 Brande William Thomas (1788-1866), 127, 150
 Bréguet Louis François Clément (1804-1883), 192, 193, 204
 Brewster David Sir (1781-1868), 121, 214
 Broca Elie Andre (1863-1925) Broca Élie André (1863-1925), 325, 338
 Broch Ole Jacob (1818-1889), 279, 290
 Brodhun Eugen (1860-1938), 338
 Brongniart Adolphe Théodore (1801-1878), 174
 Brook Abraham (floruit 1789), 186
 Brugnatelli Luigi Valentino (1761-1818), 90
 Budde Emil Arnold (1842-1921), 305
 Bugnion Édouard (1845-1939), 215
 Bunsen Robert Wilhelm 1811-1899), 179
 Burat Amédée (1809-1883), 159

- Burat Jules François (1807-1885), 159
- Bureau central météorologique, 274
- Bureau des longitudes, 64, 100, 102, 120
- Bureau international des poids et mesures (BIPM), 19, 318, 340
- Burgess George Kimball (1874-1932), 295
- Burnat Émile (1828-1920), 161
- Butillon Pierre (1817- ?), 121
- C**
- Cadiat Nicolas-Ernest (1839-1923), 209
- Cagniard de Latour Charles (1777-1859), 131
- Calau Benjamin (1724-1785), 44
- Calorique, 221
- candela, 333
- Candle power, 305, 326
- Carcel Bertrand Guillaume (1750-1812), 84
- Carlisle Anthony (1768-1842), 183
- Caroché ou Caroches Noël-Simon (1744-1813), 64
- Carré Patrice A., 211
- Cassini Jacques (1677-1756), 24
- Catalan (François Arago), 110
- Cauchois Robert-Aglaré (1776-1845), 106
- Cauchy Augustin Louis (1789-1857), 232
- Cavendish laboratory, 276
- Cazin Achille Antoine (1832-1877), 182, 185, 194, 197
- Chabrol de Volvic Gilbert Joseph Gaspard comte de (1773-1843), 130
- Chambre des députés, 101, 126
- Champagny, Jean-Baptiste de Nom-père 1er duc de Cadore (1756-1834), 63
- Chappert André, 59
- Chappey Jean-Luc, 16, 17, 61
- Chappuis Christine, 318
- Chaptal Jean-Antoine (1756-1832), 67, 69
- Charles Jacques Alexandre César (1746-1823), 80, 89
- Charles-Jacques-Henri Lagarde (1856-1890), 226, 229
- Chevreur Michel-Eugène (1786-1889), 160, 171
- Christison Robert (1797-1882), 140, 145-147, 150, 153, 212
- Claude Georges (1870-1960), 318
- Clayton John (1657-1725), 135
- Clegg Samuel (1781-1861), 52, 131, 138, 149
- Clément Nicolas (1779-1841), 150
- Climaphote, 37
- Coblentz William Weber (1873-1962), 255
- Cochery Adolphe (1819-1900), 18, 273-275, 290, 292
- Collège de France, 172, 210, 216, 274
- Comité d'instruction publique, 73
- Commentry houillères de, 174
- Commission de Saint-Cloud, 172
- Commission des phares, 73, 80, 335
- Commission internationale de l'éclairage CIE, 11, 19, 223, 257, 272, 340
- Commission internationale de la photométrie CIP, 11, 19, 272, 340
- Compagnie parisienne du gaz, 132, 173, 174, 177
- Comptes rendus hebdomadaires de

- l'Académie des sciences CRAS, 102
- Condorcet Marie Jean Antoine Nicolas de Caritat, marquis de (1743-1794), 61
- Conférence internationale des Unités électriques 1882 1884, 211, 266, 274, 279, 284, 290
- Congrès des électriciens Genève 1896, 272, 296, 302, 330
- Congrès international de l'Industrie du gaz, 11, 272, 338
- Congrès international des électriciens Chicago 1893, 271, 303
- Congrès international des électriciens Paris 1881, 211, 273, 279, 283
- Connaissance des temps ou Connaissance, 103
- Conroy John 3rd Baronet Sir (1845-1900), 119
- Conseil d'hygiène publique et de salubrité de Paris, 156
- Conseil de Paris, 101
- Conservatoire des arts et métiers, 62, 164, 274-276, 309
- Contrôle de qualité, 132, 133
- Convention du mètre, 164, 270, 272, 273, 284
- Convention nationale, 61, 62, 64
- Copley médaille, 89, 185
- Cordouan (phare), 81
- Cortial Yves, 223
- Cosmotheoros, 26, 32
- Coste Clément, 173
- Cotte Louis (1740-1815), 90
- Crova André Prosper (1833-1907), 170
- Crova André Prosper Paul (1833-1907), 226, 229, 231, 250, 260, 262-264, 303, 332
- Crowland Maurice, 17, 66
- Cruickshank William (?-1810), 182
- Cuvier Georges (1769-1832), 52
- Cyanomètre, 91
- D**
- d'Arcet Jean-Pierre-Joseph (1777-1844), 131, 156
- d'Artigues Aimé-Gabriel (1773-1848), 106
- d'Enfert Renaud, 174
- d'Hurcourt Édouard Robert (1808-1884), 136, 139, 165, 172, 179
- Daguerre Louis (1787-1851), 102, 126
- Daguerréotype, 126, 128, 181
- Daguin Pierre Adolphe (1814-1884), 197, 221
- Daigle Jean-Guy, 214
- Daniell John Frederic (1790-1845), 99
- Darrigol Olivier, 11, 28, 49
- Daumas Maurice (1910-1984), 100
- Davy Humphry (1778-1829), 90, 183, 186, 188
- Davy-Faraday Research Laboratory, 276, 297, 299
- de Broglie Louis Victor (1892-1987), 303
- de Fonvielle Wilfrid (1826-1914), 100
- de Girard, Philippe-Henri (1775-1845), 146
- de la Rive Auguste (1801-1873), 187, 189
- de Luc Jean André (1727-1817), 91, 95
- de Milly Louis-Adolphe (1799-1876), 160
- de Rossel Élisabeth-Paul-Édouard (1765-1829), 81

- de Rouvroy Claude-Henri comte de
Saint-Simon (1760-1825), 173
- de Saussure Horace Bénédict (1740-
1799), 90, 94, 95
- de Wecker Louis (1832-1906), 216,
226
- Debray Henri (1827-1888), 285
- Delaroche François Étienne (1781-
1813), 67, 142
- Deleuil Louis-Joseph (1795-1862), 176,
180, 288
- Desains Paul (1817-1885), 113, 282
- Descartes René (1596-1650), 35
- Dhombres Jean, 16, 17, 61
- Dhombres Nicole, 16, 61
- DiLaura David L., 11, 49, 51, 207,
208
- Directoire, 73
- Dollfus Auguste (1832-1911), 161
- Dollfus Gustave (1829-1905), 161
- Dollond John (1706-1761), 106
- Donders Franciscus (1818-1889), 216
- Dortous de Mairan Jean-Jacques (1678-
1771), 26, 35
- Draper John William (1811-1882),
225, 237, 246
- Drummond lumière, 181
- du Bois-Reymond Emil Heinrich (1818-
1896), 211
- Du Moncel Théodose (1821-1884),
210
- Duboscq Jules (1817-1886), 116, 166,
168, 264
- Dubost Lucien (1856-1918), 209
- Dulong Pierre Louis (1785-1838), 65,
99, 191
- Dumas Jean-Baptiste (1800-1884),
149, 152, 155, 174, 176, 177,
180, 188, 211, 270, 275, 278,
280, 284
- Durand Émile, 177, 179, 269
- E**
- Ebelmen Jacques-Joseph (1814-1852),
172
- École centrale de Lyon, 339
- École centrale des arts et manufac-
tures, 161, 191, 201, 279, 339
- École centrale des travaux publics,
16, 64, 130
- École de physique et de chimie in-
dustrielles de la ville de Pa-
ris, 318, 323
- École des mines, 173
- École des mineurs de Saint-Étienne,
154
- École des ponts et chaussées, 73,
172, 302, 320, 335
- École normale supérieure, 190, 214,
282, 285, 309
- École normale dite de l'an III, 64
- École polytechnique, 64, 72, 73, 160,
183, 232
- École préparatoire de Paris, 190
- École royale des ponts et chaussées,
64
- École royale du génie de Mézières,
16, 64
- École supérieure de télégraphie, 273
- École Turgot, 174
- Edison Thomas Alva (1847-1931),
207, 210
- Electrotechnische Zeitschrift, 210
- Ellis George Edward (1814-1894),
52
- Emerson Walter Bradbury (1891-1980),
255
- Étalon Violle, 292, 293, 295, 297,
299, 302, 315, 316, 337
- Éther, 35
- Euler Leonhard (1707-1783), 13, 43,
45, 49, 72

- Exposition internationale d'électricité Paris 1881, 210, 275
- Exposition publique des produits de l'industrie française, 63, 82, 85
- Exposition universelle d'art et d'industrie Paris 1867, 272
- F**
- Féry Charles (1865-1935), 323
- Fabry Marie Paul Auguste Charles (1867-1945), 265, 292, 322
- Faculté des Sciences de Marseille, 215, 259
- Faculté des sciences de Paris, 174, 191, 201, 210, 282
- Faraday Michael (1791-1867), 191
- Fauque Danielle, 22, 23, 108
- Faye Hervé (1814-1902), 120
- Fechner Gustav Theodor (1801-1887), 40, 197
- Festing Edward Robert (1839-1912), 147, 253
- Figuier Guillaume Louis (1819-1894), 208
- Figure de la terre, 24
- Fizeau Armand Hippolyte Louis (1819-1896), 127, 181
- Flachat Eugène (1802-1873), 159, 160
- Fleury Pierre (1894-1976), 281, 292, 298, 299
- flicker méthode du, 256
- Fontaine Hippolyte (1833-1910), 208
- Fontanon Claudine, 276
- Forel Augustin (1848-1931), 215
- Formey Johann Heinrich Samuel (1711-1797), 43
- Fortin Jean-Nicolas (1750-1831), 106
- Foster Georges Carey (1835-1919), 306
- Foucault Jean Bernard Léon (1819-1868), 11, 127, 167, 168, 170, 171, 175, 181, 208
- Fourier Joseph (1768-1830), 66, 99, 128
- Fox Robert, 16, 17, 61
- François Marie capucin (1634-1714), 27, 92
- Franchot Charles-Louis-Félix (1809-1881), 181
- Franklin Benjamin (1706-1790), 185
- Fraunhofer Joseph von (1787-1826), 222, 226, 232, 236, 250
- Fresnel Augustin (1788-1827), 16, 17, 59, 60, 72-76, 81, 82, 84-87, 99, 102, 108, 109, 120, 127, 152, 157, 335
- Fresnel Léonor (1790-1869), 81, 83, 86, 165, 174
- Fressoz Jean-Baptiste, 159
- Fyfe Andrew (1792-1861), 138, 139
- G**
- Gaillard Aurélia, 44
- Galezowski Xavier (1832-1907), 216
- Gambey Henri (1787-1847), 106, 116, 117, 120
- Gaultier de Claubry Henri-François 1792-1878), 156
- Gay-Lussac Joseph-Louis (1778-1850), 65, 90, 149, 151, 160
- Gaz oléfiant ou oléfiant, 137
- Gibson Kasson S. (1890-1979), 257
- Gilbert Ludwig Wilhelm (1769-1824), 89
- Gilbert William (1544-1603), 182
- Godin Louis (1704-1760), 24
- Goujon Émile (1823-1856), 120
- Grévy Jules François Paul (1807-1891), 273
- Gradation de la lumière, 21, 22, 30, 31, 41, 89, 94, 110

- Gradulucique, 37
 Grandjean de Fouchy Jean-Paul (1707-1788), 22, 103
 Grégoire Henri Jean-Baptiste dit l'abbé Grégoire (1750-1831), 62, 64
 Grimaldi Francesco Maria (1618-1663), 72
 Guichard Charlotte, 44
 Guillaume Charles-Édouard(1861-1938), 318
 Guinand Aimé (1780-1857), 204
 Guinand Henri (1771-1852), 204
 Guinand Pierre-Louis (1748-1824), 204
 Guyton de Morveau Louis Bernard (1737-1816), 83, 150
 Guyton de Morveau Louis-Bernard (1737-1816), 95
- H**
- Harris William Snow (1791-1867), 185, 189, 190
 Harrison John (1693-1776), 24
 Harvard observatoire astronomique, 125
 Hassenfratz Jean-Henry (1755-1827), 77–80
 Hau Michel, 161
 Haussmann Georges Eugène (1809-1891), 177, 181
 Haute optique, 127
 Hefner-Alteneck Friedrich von (1845-1906), 280, 333
 Hefnerkerze HK ou bougie Hefner, 280, 296, 305, 306
 Helmholtz, Hermann von (1821-1894), 11, 211, 212, 216, 218, 221, 227, 238, 276, 292
 Henry Joseph (1797-1878), 192, 304
 Henry William (1774-1836), 137
 Hering Ewald (1834-1918), 218
 Herschel John Frederick William (1792-1871), 88, 99
 Herschel William (1738-1822), 67, 89, 221, 222, 236, 255
 Hertz Heinrich (1857-1894), 77
 Herz Cornelius (1845-1898), 301
 Holmgren Frithiof (1831-1897), 218
 Hooke Robert (1635-1703), 72
 Hôpital Saint-Louis, 130
 Horner Johann Friedrich (1831-1886), 215
 Horner Johann Kaspar (1774-1834), 91
 Hospitalier Édouard (1852-1907), 309, 318, 324
 Humboldt Wilhelm Heinrich Alexander von (1769-1859), 91, 99, 110, 150
 Hutton James (1726-1797), 97
 Huygens Christiaan (1629-1695), 9, 26, 32, 45, 60, 72, 104
 Hydrogène bicarboné ou percarboné, 136
 Hydrogène protocarboné, 136
- I**
- Ingenhousz Jan (1730-1799), 185
 Institut national, 62, 80, 100, 106, 121
 Institut national de la propriété industrielle INPI, 89, 134, 181
 Institution of Electrical Engineers, 295, 316
 Ives Herbert Eugene (1882-1953), 256, 257
- J**
- Jablochkoff Pavel (1847-1894), 208
 Jamet Victor (1853-1919), 217
 Jamin Jules Célestin (1818-1886), 100, 120, 193, 210, 211, 232

- Jeanneney Paul Marie Joseph (1812-1862), 160, 161, 176, 180
- Jobard Marcellin (1792-1861), 166
- Johnston, Sean François, 11, 213, 276
- Journal des Scavans, 27
- Journal für Gasbeleuchtung, 210
- Jupiter satellites de, 103
- Jussieu Joseph de (1704-1779), 24
- K**
- Kant Emmanuel (1724-1804), 66
- Kepler Johannes (1571-1630), 28
- Kirchhoff Gustav (1824-1887), 211
- König Arthur Peter (1856-1901), 254
- Krüss Hugo (1853-1925), 254
- Kurlbaum Ferdinand (1857-1927), 296
- L**
- L'industrie électrique ou Revue de la science électrique, 318
- L'Alliance, 210
- La Condamine Charles-Marie de (1701-1774), 24
- La Lumière électrique Journal universel d'électricité, 210, 317
- La Reynie Gabriel Nicolas de (1625-1709), 130
- la Villette usine expérimentale de, 171, 173, 174
- Laboratoire central d'électricité (LCE), 11, 275, 303, 309, 313
- Laboratoire d'essais, 11, 276
- Lacaille ou La Caille Nicolas-Louis de (1713-1762), 118
- Lagarde Charles Jacques Henri (1856-1890), 231, 250
- Lakanal Joseph (1762-1845), 64
- Lamartine Alphonse Marie Louis de Prat de (1790-1869), 101
- Lambert Jean-Henri (1728-1777), 11-14, 16, 21, 42-44, 46-51, 57, 76, 104, 125, 142, 204
- Lamé Gabriel (1795-1870), 72
- Lamontagne Roland, 22
- Lampadius Wilhelm August (1772-1842), 91
- lampe à acetate d'amyle, 280
- Lampe à double courant d'air, 78
- Lampe à modérateur, 171, 243
- Lampe au pentane de Vernon-Harcourt, 271, 306
- Lampe Carcel, 156, 157, 175, 180, 197, 198, 243, 249, 269, 271, 278, 281, 288, 305, 320
- Lampe Hefner, 271
- Lampe modérateur, 180
- Landis Carney (1897-1962), 256
- Landolt Edmond (1846-1926), 226, 333
- Langevin Paul (1872-1946), 211
- Langley Samuel Pierpont (1834-1906), 230, 231, 235
- Laplace Pierre Simon marquis de (1749-1827), 17, 60, 65, 71, 100
- Laugier Ernest (1812-1872), 114, 115, 118, 120, 121, 124, 125
- Lavoisier Antoine (1743-1794), 61, 65
- Le Chatelier Henry (1850-1936), 172, 309, 316
- Le Chatelier Louis (1815-1873), 173
- Le Gaz journal, 177
- Le Grand Yves (1908-1986), 250
- Le Verrier Urbain Jean Joseph (1811-1877), 125
- Leblanc Félix (1813-1886), 279
- Lebon dit d'Humbersin Philippe (1765-1805), 134, 135

- Legendre Adrien-Marie (1752-1833), 16, 73
 Lemonnier Paul-Hippolyte (1836-1894), 288, 307
 Lenoir Étienne (1744-1832), 81, 89, 274
 Lenz Robert (1833-1903), 279
 Lequeux James, 100, 102
 Lequeux, James, 11
 Leslie John (1766-1832), 89, 95, 97, 132, 140, 142, 144, 145, 147
 Leslie photomètre de, 96, 132, 141, 150
 Levitt Theresa, 74, 109
 Levot Prosper Jean (1801-1878), 23
 Leyde bouteille de, 183, 185, 190, 192, 194
 Liebenthal Emil (1859- ?), 213, 254, 280, 338
 Liouville Ernest (1812-1880), 120
 Loi de Bouguer-Masson, 239, 240
 Lucimètre, 27, 93
 Lumenmètre, 334
 Lummer Otto Richard (1860–1925), 296, 305, 338
 Lychnomena lampe dite, 84
- M**
- Macé de Lépinay Jules (1851-1904), 18, 209, 213, 214, 217, 218, 220, 223, 225, 226, 230–234, 237–239, 241, 242, 244, 246, 249, 252–254, 258, 259, 261, 266, 310, 332
 Magnien Maurice (1920-2001), 326, 328
 Maheu Gilles, 22, 23, 25
 Maire Albert (1856-1931), 191
 Malebranche Nicolas (1638-1715), 35
 Malus Louis-Étienne (1775-1812), 10, 16
 Malus Louis-Étienne (1775-1812), 60, 65, 71, 80, 102, 104, 109, 110, 113, 127
 Marcolongo Francis J., 28
 Marquet Louis, 275
 Mary Louis Charles (1791-1870), 165, 174
 Mascart Éleuthère (1837-1908), 59, 76, 210, 211, 274
 Massard-Guilbaud Geneviève, 165
 Masson Antoine-Philibert (1806-1860), 14, 17, 133, 181, 189–193, 195, 197–204, 239
 Mathieu Claude-Louis (1783-1875), 81, 83
 Matthey George (1825-1913), 285
 Maupertuis Pierre Louis Moreau de (1698-1759), 24
 Mauvais Victor (1809-1854), 120
 Maxwell James Clerk (1831-1879), 77, 218
 Mayrargue Arnaud, 23
 Méchain Pierre François André (1744-1804), 101
 Méridien de Paris, 101, 103
 Mersenne Marin (1588-1648), 28
 Méthode pas à pas, 256
 Michaud Louis-Gabriel (1773-1858), 43
 Moigno François Napoléon Marie dit l'abbé Moigno (1804-1884), 167
 Moissan Henri (1852-1907), 309
 Molé Louis-Mathieu (1781-1855), 80
 Monge Gaspard comte de Péluse (1746-1818), 16
 Monge Gaspard comte de Péluse (1746-1818), 79
 Morère Jean-Édouard, 22, 25, 39
 Morgan William (1750-1833), 186
 Morin Arthur (1795-1880), 171, 275

Murdoch William (1754-1839), 134
 Muriatique acide, 68
 Muséum national d'histoire naturelle,
 62

N

Napoléon III, 167, 171
 National Electric Lamp Association
 N.E.L.A., 257
 National Physical Laboratory (NPL),
 11, 276
 Neufchâteau Nicolas François dit Fran-
 çois de Neufchâteau (1750-
 1828), 63
 Newton Isaac (1642-1727), 9, 12, 45,
 60, 66, 72, 107, 236
 Nicati William (1850-1931), 18, 209,
 213, 215, 218, 220, 223, 225,
 226, 230–234, 237–239, 241,
 242, 244, 246, 249, 252–254,
 258, 259, 266, 310, 332
 Nichols Edward Leamington (1854-
 1937), 304
 Nicholson William (1753-1815), 95,
 183
 Nicod-Delom Jean-Samuel, 94
 Nicol prisme de, 125, 129, 250, 264
 Nicol William (1766-1851), 123, 385
 Niépce Joseph dit Nicéphore Niépce
 (1765-1833), 102, 126

O

Observateur photométrique de référé-
 nce, 213, 258
 Observatoire d'Allegheny, 231
 Observatoire de Paris, 11, 61, 64,
 83, 101, 102, 104, 106, 114,
 115, 120, 125, 167
 Œuf électrique, 194
 Optotype, 230
 Ott Florence, 149, 161

P

Péligot Eugène (1811-1890), 172
 Palaz Adrien (1863-1930), 40, 53,
 94, 147, 179, 210, 270, 273,
 277, 293, 301, 305
 Paquier Serge, 131
 Pardies Ignace Gaston (1636-1674),
 72
 Paul Harry, 276
 Pavé de Paris, 81
 Payen, Anselme (1795-1871), 156,
 166
 Pécelet Jean Claude Eugène (1793-
 1857), 156, 157, 191
 Pelouze Edmond (?-1850), 154
 Pelouze Théophile-Jules (1807-1867),
 154
 Penot Achille (1801-1885), 161
 Perdonnet Auguste (1801-1867), 159
 Péreire Émile (1800-1875), 171
 Péreire Isaac (1806-1880), 171
 Péreire les frères, 173, 181
 Petavel Joseph-Ernest (1873-1936),
 281, 288, 295, 297, 298
 Petit Alexis Thérèse (1791-1820), 99
 Petit Frédéric (1810-1865), 115, 118,
 120
 Petitgirard Loic, 276
 Petrov Vassili (1761-1834), 183
 Photomètre à compartiment, 167,
 170, 175
 Photomètre à pile de glaces, 166,
 168, 170
 Photomètre de Bouguer-Rumford,
 145, 255
 Photomètre de Lummer et Brodhun,
 299
 Photomètre de Bunsen, 290, 312
 Photomètre de Foucault voir photo-
 mètre à compartiment, 177,
 262, 264, 288, 312

- Photomètre de Rumford, 225, 226, 239, 242, 253
- Photomètre universel, 338
- Photométrie électrique, 189, 190
- Physikalisch Technische Reichsanstalt (PTR), 11, 276, 280, 294
- Pickering Edward Charles (1846-1919), 125
- Plantamour Émile (1815-1882), 120
- Platinum light standard PLS, 277
- Pogson Robert (1829-1891), 124
- Poincaré Henri (1854-1912), 76
- Poisson Louis (1777-1859), 131
- Poisson Siméon Denis (1781-1840), 16, 65
- Polarimétrie, 121, 127
- Polarisation chromatique, 109, 126
- Polarisation de la lumière, 61, 68, 88, 104, 106, 107, 121, 122, 127
- Polarisation rotatoire, 108, 109, 127
- Ponts et Chaussées administration des, 165
- Postes et Télégraphes, 18, 273, 274
- Potter Richard (1799-1868), 119
- Pouillet Claude (1790-1868), 99, 156, 157, 171, 191
- Pouvoir éclairant, 99, 100, 127, 131–133, 136, 138, 139, 141, 142, 144, 146, 148, 152, 156, 162, 166, 167, 171, 173, 174, 176, 177, 179, 181, 209, 212, 220, 222, 270, 288, 320
- Preece William Henry (1834-1913), 293
- Premier Consul, 183
- Psychophysique, 40
- Purkyně effet ou phénomène de, 229, 238, 240, 241, 245, 249, 254, 255, 267, 310
- Purkyně Jan Evangelista (1787-1869), 14, 18, 209, 212, 227, 234, 241
- Pyrogénéation, 136
- pyr, 328, 333
- Pyroligneux acide, 134
- Q**
- Quinquet Antoine (1745-1803), 78, 84
- Quinquet bec de, 84, 129, 269
- R**
- Ranvier Louis-Antoine (1835-1922), 216
- Rasmussen Anne, 272
- Reculin Sophie, 129
- Regnault Henri Victor (1810-1878), 136, 171, 173, 176, 177, 180, 270, 278, 280
- Rey Roselyne (1951-1995), 137
- Reyneau Charles-René (1658-1728), 23
- Riess Peter Theophil (1804-1883), 189, 190
- Rietsch Maximilien (1848-1905), 260
- Ritchie William (vers 1790-1837), 141, 142, 144, 146, 147
- Ritter, Johann Wilhelm (1776-1810), 68
- Robert Ernest Adolphe (1833-1899), 67
- Rochon Alexis-Marie (1741-1817), 108, 111, 123
- Rochon biprisme de, 111, 123, 125, 129
- Rochon micromètre de, 125
- Ronchi Vasco, 212
- Rood Ogden Nicholas (1831-1902), 256
- Rose métal de, 187
- Rosmorduc Jean, 109

- Rossetti Francesco (1833-1884), 307
 Rowland Henry Augustus (1848-1901), 211
 Royal Institution, 184, 276, 297
 Royal Society, 109, 183, 185, 191
 Ruhmkorff Heinrich Daniel (1803-1877), 204
 Rumford médaille, 109
- S**
- Sabine Robert Henry (1837-1884), 94
 Sacha Loeve, 136
 Sadi Carnot Nicolas Léonard (1796-1832), 66
 Saillard Michel, 43, 223
 Saint-Germain en Laye ligne de Paris à, 172
 Sainte-Claire Deville Henri (1818-1881), 285
 Sautter Louis (1825-1912), 288, 307, 311
 Savart Félix (1791-1841), 195
 Schilling Nikolaus Heinrich (1826-1894), 178, 181
 Schönbein Christian Friedrich (1799-1868), 188
 Schroeder-Gudehus Brigitte, 303
 Schuckert Johann Sigmund (1846-1895), 319
 Schuckert projecteur, 325
 Schwendler Carl Louis (1838-1882), 277
 Scotome central, 244, 255
 Séguier Pierre-Armand (1803-1876), 166
 Seine département de la, 101, 130, 164, 173, 177
 Serrin Victor (1829-1905), 208
 Service des phares, 288, 303, 319, 320, 334, 335
 Seuil différentiel, 40
 Siemens, Werner von (1816-1892), 11, 211, 276, 285, 294
 Silvant Claire, 173
 Sirius, 26, 89
 Snellen (Herman 1834-1908), 216
 Société d'Arcueil, 17, 60, 65, 67, 109
 Société d'Encouragement pour l'industrie nationale, 154, 156
 Société des ingénieurs civils, 160
 Société française de physique, 318
 Société industrielle de Mulhouse, 149, 154, 160, 161
 Société internationale des électriciens, 210, 270, 275, 309, 318
 Société philomatique de Paris, 15, 62
 Société royale, 130
 Société royale de Harlem, 204
 Société royale de médecine, 90
 Société technique de l'industrie du gaz, 131, 150, 338
 Soleil Jean-Baptiste (1798-1878), 86, 106, 112, 116, 202
 Sorbonne, 210
 Spath d'Islande, 67, 104, 107, 108, 111, 123, 125
 Spermaceti blanc de baleine, 133, 180
 Spitta Edmund Johnson (1853-1921), 94
 Staite William Edwards (1809-1854), 208
 Stevenson Robert (1772-1850), 86
 Suinter, 161
 Swan Joseph Wilson (1828-1914), 207
 Swinburne James Sir (1858-1958), 271, 315

T

- Thénard Louis Jacques (1777-1857),
90, 183
- Thermolampe, 134
- Thompson Benjamin comte Rumford (1753-1814), 16, 22, 51, 52, 54, 55, 57, 83, 84, 87, 89, 132, 140, 142, 168
- Thompson Silvanus Phillips (1851-1916), 271, 304, 306, 315, 319
- Thomson Lord Kelvin William (1824-1907), 211, 291
- Tobin, William, 11
- Toricelli tube de, 194
- Tresca Gustave Jules (1846-1918), 307, 309
- Tresca Henri Édouard (1814-1885), 275
- Trotter Alexander Pelham (1857-1947), 316
- Turner Edward (1796-1837), 140, 145-147, 150, 153, 212
- Tyndall Edward P. T. (1893-1979), 257

U

- US Bureau of Standards (USBS), 11, 257, 266

V

- Vandermonde Alexandre-Théophile (1735-1796), 79
- Vautier Paul-Émile (1818-1889), 339
- Vautier Théodore (1852-1930), 11, 272, 338, 340
- Verdet Marcel Émile (1824-1866), 71
- Vernon Harcourt Augustus George (1834-1919), 271
- Vieille Paul (1854-1934), 309

- Vierordt Karl von (1818-1884), 223, 225, 250
- Villarceau Antoine Yvon (1813-1883), 121
- Violle Jules Louis Gabriel (1841-1923), 18, 211, 215, 271, 278, 281-283, 285, 287, 288, 290, 292, 297, 304, 307, 309, 314, 316, 338
- Visibilité courbe ou fonction de, 213, 223, 253, 257
- Volta Alessandro (1745-1827), 182

W

- Wagner Bernard-Henri (1790-1855), 87, 152
- Walsh John (1726-1795), 185
- Walsh John William Tudor (1892-1962), 255, 260, 293
- Watt James (1736-1819), 134
- Weisz George, 16
- Wheatstone Charles (1802-1875), 204
- Wiedemann Eilhard Ernst Gustav (1852-1928), 291
- Williot Jean-Pierre, 131
- Winzler Frédéric Albert alias Winsor (1763-1830), 134
- Wiveleslie Abney William de (1843-1920), 147, 230, 253, 291, 306, 315
- Wollaston William Hyde (1766-1828), 68, 89

Y

- Young Thomas (1773-1829), 60, 72, 109, 218

Z

- Zénobe Gramme (1826-1901), 210
- Zöllner Johann Karl Friedrich (1834-1882), 278

Titre : L'histoire de la photométrie en France au XIX^e siècle. La mesure de la lumière entre métrologie physique et métrologie sensorielle.

Mots clés : photométrie, métrologie, spectre, effet Purkyně, acuité visuelle, étalon Violle.

Résumé : La photométrie est la science qui s'intéresse à la mesure de la lumière, à l'intensité, l'éclat, la brillance des sources lumineuses. Ses principes et ses méthodes ont été définis au XVIII^e siècle, en partie par Pierre Bouguer (1698-1758), dans son *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, publié en 1729. Pourtant, un siècle plus tard, en 1833, François Arago (1786-1853) évoque, devant ses confrères académiciens, une science « restée à peu près stationnaire », à côté « des progrès brillants et inespérés » de l'optique. Mêmement, en 1894, dans la revue *La Lumière électrique*, André Blondel (1863-1938), un jeune ingénieur employé au Service des phares et balises, se plaint du « peu de développement théorique » d'une science qui « a conservé sans grand changement la phraséologie qu'elle a reçue du XVIII^e siècle ». Il s'agit ici de questionner la *langueur* supposée de la photométrie pendant tout le XIX^e siècle. Le dépouillement des abondantes sources imprimées (revues scientifiques, professionnelles et

une presse de vulgarisation en pleine expansion) a mis en lumière les travaux des *photomètres* du XIX^e siècle et leur implication dans l'industrie de l'éclairage, avec l'appui des pouvoirs publics. Cette recherche livre aussi une analyse inédite des travaux de savants méconnus : ceux d'Antoine-Philibert Masson sur la photométrie de l'étincelle électrique et ceux réalisés à Marseille de 1879 à 1884 par Jules Macé de Lépinay et William Nicati sur la photométrie des sources colorées. Ces études où les effets physiologiques propres à la vision le disputent aux phénomènes physiques ont permis d'affirmer la place de la photométrie entre la métrologie physique et la métrologie sensorielle. Enfin, les recommandations sur l'unité de lumière, formulées lors des congrès internationaux des électriciens qui s'échelonnent de 1881 à 1900 ont été examinées ainsi que la présomption contre l'étalon Violle.

Title : The history of photometry in France during the nineteenth century. The measurement of light between physical metrology and sensory metrology.

Keywords : photometry, metrology, spectrum, Purkyně effect, visual acuity, Violle standard.

Abstract : Photometry is the science devoted to the measurement of light : the intensity, brightness, brilliance of sources of light. Its principles and methods were defined during the eighteenth century, in part by Pierre Bouguer (1698-1758), in his *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, published in 1729. However, a century later, on 5 August 1833, François Arago (1786-1853) spoke, in front of his academic colleagues, of a science that "remained more or less stationary", alongside "brilliant and unexpected progress" in optics. In the same way, in the magazine *La Lumière Electrique* (1894), André Blondel (1863-1938), an engineer employed at the "Service des phares et balises" (French authority overseeing lighthouses and beacons) complains of « so few theoretical developments » in a science "which retained without much change the phraseology inherited from the eighteenth century." The aim of this research is to question the supposed languor of photometry throughout the nineteenth century.

The analysis of the abundant printed sources (scientific and professional journals and rapidly expanding scientific popular press) highlights the work of photometric engineers of the nineteenth century and their involvement in the lighting industry, with the support of public authorities. This research also provides an unprecedented analysis of the work of little-known scientists : those of Antoine-Philibert Masson on the photometry of the electric spark and those carried out in Marseille, from 1879 to 1884, by Jules Macé de Lépinay and William Nicati on the photometry of coloured sources. These studies in which the physiological effects specific to vision compete with physical phenomena made it possible to affirm the place of photometry between physical metrology and sensory metrology. Finally, the recommendations on the unity of light, formulated during the international congresses of electricians which took place from 1881 to 1900, are examined, as well as the presumption against the Violle standard.