Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843, histoire d'une interaction réussie entre science et photographie

Jérôme Fatet

▶ **To cite this version:**

Jérôme Fatet. Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843, histoire d'une interaction réussie entre science et photographie . Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Université Claude Bernard Lyon 1, 2005. Français. NNT : 2005LYO10237 . tel-01164450

HAL Id: tel-01164450
https://hal.science/tel-01164450

Submitted on 16 Jun 2015

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.

N° d'ordre 237-2005 Année 2005

THESE

présentée

devant l'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

pour l'obtention

du DIPLOME DE DOCTORAT

(arrêté du 25 avril 2002)

Discipline : Histoire et philosophie des sciences

présentée et soutenue publiquement le
5 décembre 2005

par

M. Jérôme FATET

TITRE :

Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843
Histoire d'une interaction réussie entre science et photographie

Directeur de thèse :

M. Jérôme VIARD

JURY : M. Daniel SIMON, Professeur, Université Claude Bernard : Président
Mme Christine BLONDEL, CR CNRS, CRHST : Rapporteur
M. Friedrich STEINLE, Professeur, Université de Wuppertal : Rapporteur
M. Jean-Louis MARIGNIER, CR CNRS, Université Paris-sud : Examinateur
M. Jean-Pierre MILLET, Professeur, INSA de LYON : Examinateur
M. Jérôme VIARD, MCF, Université Claude Bernard : Directeur de thèse

N° d'ordre 237-2005 Année 2005

THESE

présentée

devant l'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

pour l'obtention

du DIPLOME DE DOCTORAT

(arrêté du 25 avril 2002)

Discipline : Histoire et philosophie des sciences

présentée et soutenue publiquement le
5 décembre 2005

par

M. Jérôme FATET

TITRE :

Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843, Histoire d'une interaction réussie entre science et photographie

Directeur de thèse :

M. Jérôme VIARD

JURY : M. Daniel SIMON, Professeur, Université Claude Bernard : Président
Mme Christine BLONDEL, CR CNRS, CRHST : Rapporteur
M.Friedrich STEINLE, Professeur, Université de Wuppertal : Rapporteur
M.Jean-Louis MARIGNIER, CR CNRS, Université Paris-sud : Examinateur
M. Jean-Pierre MILLET, Professeur, INSA de LYON : Examinateur
M. Jérôme VIARD, MCF, Université Claude Bernard : Directeur de thèse

Il me faut tout d'abord ici remercier tout ceux qui ont su, pendant les années qu'a duré ce travail et bien au delà, m'accompagner par leurs encouragements et leur présence.

Mes amis, de la ville à la campagne, ont su m'offrir leurs rires dans les moments difficiles, m'élever ou me ramener sur terre, quand cela était nécessaire. Certains sont là, certains sont loin, d'autres partis. Merci à tous.

Ma famille a su m'apprendre que le talent est en chacun. Elle m'a appris le goût du travail et le plaisir de l'amitié. Saurai-je l'en remercier ?

Merci à Maud, sans qui je serais bien loin d'ici actuellement. Tu as su me conduire parfois là où je n'aurais pas pensé pouvoir aller, et parfois me suivre sans douter de mes choix. Rien de tout cela n'aurait été possible sans toi.

Le LIRDHiST m'a offert un espace de réflexion riche et dynamique. Son accueil, son ouverture d'esprit permettent un épanouissement intellectuel rare. Durant ces années, ceux qui en sont partis ont laissé un grand vide. Ceux qui y sont venus ont su le combler. Je tiens à remercier particulièrement Bernard Tribollet, directeur du laboratoire, Matteo et Thomas.

Mes remerciements vont enfin à Jérôme Viard. Sa disponibilité, sa curiosité et sa vivacité d'esprit m'ont permis de cerner et de structurer ce travail. Mais il a surtout su me montrer qu'il est possible de rester droit, honnête et fidèle quand les évènements m'amenaient à en douter. J'espère avoir la force de suivre son exemple. Merci.

Table des matières

Introduction générale et problématique 9

0. Un patronyme célèbre, un personnage peu connu 10

1. Période étudiée 12

2. Objectif : reconstruire le processus d'invention de l'actinomètre électrochimique, élucider les termes du débat qu'il suscite 12

3. Méthodologie : de l'étude des textes à la réplication 17

4. Hypothèses de travail, questions de recherche 18

Première partie : Eléments biographiques, formation et compétences d'Edmond Becquerel 22

1. Histoire familiale et enfance d'Edmond Becquerel 23

1.1. Histoire familiale 23

1.2. L'enfance d'Edmond Becquerel 25

2. Le personnage social d'Edmond Becquerel 29

3. Une formation scientifique particulière 31

4. La carrière d'Edmond Becquerel au delà de la période étudiée 33

5. Les compétences spécifiques De Becquerel dans le domaine photographique 35

5.1. Brève histoire de la naissance de la photographie 35

5.1.1. Apparition et diffusion des procédés 35
5.1.2. Le procédé daguerréotype 37

5.2. Les compétences particulières d'Edmond Becquerel 39

6. Contexte scientifique de l'étude de la lumière 41

6.1. L'idée de mesurer la lumière 41

6.2. L'analyse du spectre lumineux 43

Conclusion 45

Seconde partie : Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière 47

1. Le premier appareil à deux phases. 53

1.1. Objectif et description de l'appareil 53

1.2. Expériences réalisées et résultats 55

2. Vers un second appareil 59

2.1. La recherche de « l'absence d'effets » 59

2.2. La recherche des causes des effets mesurés : vers la photographie 62

3. La thèse d'Edmond Becquerel 65

4. La découverte de nouveaux rayons 66

5. La naissance de l'actinomètre électrochimique 69

5.1. Description de l'appareil, mode d'utilisation 69

5.2. Les expériences menées avec l'actinomètre électrochimique 73

5.2.1. la vérification des propriétés des rayons excitateurs 73
5.2.2. La comparaison des spectres de différentes origines 74
5.2.3. L'analyse fine du spectre solaire 75

Conclusion 78

Troisième partie : La réplication des expériences d'Edmond Becquerel 80

1. Le choix d'un lieu 82

2. Le choix de l'appareil de mesure 84

3. Le premier appareil à deux phases 86

3.1.La fabrication de l'appareil 86

3.2.La mise en place de l'expérimentation 88

3.3.La réalisation des expériences 88

4. L'appareil à deux compartiments 92

4.1.La fabrication de l'appareil 92

4.2.La mise en place de l'expérimentation 96

4.3.La réalisation des expériences 97

5. L'actinomètre électrochimique 103

5.1.La fabrication de l'appareil 103

5.2.La mise en place de l'expérimentation 107

5.3.La réalisation des expériences 109

Conclusion 112

Quatrième partie : Analyse du contenu théorique des recherches de Becquerel 116

1. Une théorie de l'électricité ? 118

2. Une théorie de la réaction chimique ? 122

3. Une théorie de la lumière ? 124

3.1. Jean-Baptiste Biot, son œuvre et ses relations professionnelles 125

3.2. Le schéma intellectuel sous-jacent aux travaux de Becquerel 128

3.3. Le déroulement de la controverse 131

3.4. Une théorie de la lumière dans les travaux d'Edmond Becquerel ? 141

3.5. La fonction de la controverse dans le travail d'Edmond Becquerel 142

4. Vers une théorie du procédé photographique ? 143

5. La découverte de l'effet photovoltaïque ? 144

Conclusion 146

Cinquième partie : contexte théorique des concepts utilisés dans ce travail 148

1. Rôles et fonctions de l'expérience dans l'activité scientifique 149

1.1. Rôles et fonctions du résultat expérimental 149

1.1.1 Le point de vue de Ian Hacking 150
1.1.2 Les critères de validations d'Alan Franklin 151
1.1.3 L'élaboration expérimentale chez Peter Galison 153
1.1.4 Collins, où la régression de l'expérimentateur 155
1.1.5 Pickering ou l'opportunisme 157
1.1.6 L'intervention de Hacking 158

1.2. Rôles et fonctions de l'expérience dans l'activité scientifique 159

1.2.1 L'expérience détachée de la théorie 160
1.2.2 L'expérience comme confirmation ou réfutation d'une théorie 161
1.2.3 Complexification de la relation expérience théorie 162

2. Rôles et fonctions de l'expérience dans le travail d'Edmond Becquerel 163

2.1. Le premier appareil à deux phases 164

2.2. Le second appareil : mise en place d'un procédé différentiel 164

2.3. L'actinomètre électrochimique 168

3. La question de la mesure 172

3.1. Le problème de la mesure posé par l'actinomètre 172

3.2. La question de la quantification 175

4. L'importance de la controverse 178

4.1. Le rôle des controverses dans la pratique scientifique 178

4.1.1 Qu'est ce qu'une controverse ? 178
4.1.2 La controverse scientifique 179

4.2. Le cas de la controverse Biot-Becquerel 181

4.2.1 Ce débat est-il une controverse ? 181
4.2.2 Comment exploiter cette controverse ? 184

5. La réplication d'expériences scientifiques 185

5.1. Rôle de la réplication dans l'investigation en histoire des sciences 185
5.2. Comment réaliser une réplication ? 189

5.3. La réplication des expériences d'Edmond Becquerel 190

5.3.1 Le corps des appareils 190
5.3.2 Le problème de l'outil de mesure 191
5.3.3 La réplication des expériences 192

Conclusion 193

Conclusion générale 195

Références bibliographiques 205

Annexes 213

Introduction générale et problématique

Introduction générale et problématique

C'est lors de la réalisation de notre mémoire de DEA que nous avons rencontré pour la première fois le personnage d'Edmond Becquerel. Ce travail traitait de l'histoire de la photographie, dans sa première époque, et de ses liens avec la recherche scientifique. Une partie de cette recherche consistait en une analyse quantitative des publications au sein des comptes rendus de l'Académie des sciences traitant de la photographie. L'objectif de celle-ci était d'identifier la progression du nombre des travaux menés sur ce sujet à partir de 1839, date de la publication du procédé daguerréotype. Lors de cette étude nous avons pu observer que certaines des communications d'Edmond Becquerel de cette époque sont à la fois répertoriées, dans les tables des comptes rendus de l'Académie des sciences, dans la rubrique *photographie* et dans les rubriques *physique appliquée* ou *chimie appliquée.* Nous avons été intrigués par ces référencements multiples, contemporains à la rédaction des communications. Il nous a semblé intéressant d'étudier les travaux de ce chercheur que la communauté scientifique de son époque semblait situer à l'intermédiaire entre la physique et la photographie. L'idée de départ de notre recherche de doctorat était alors d'étudier différents cas d'interactions entre sciences et photographie dans l'histoire. Mais le cas particulier d'Edmond Becquerel s'est révélé suffisamment vaste et complexe pour nécessiter que l'on concentre la totalité de la recherche sur lui seul, puisqu'il a nécessité, en plus de l'analyse des textes, que nous réalisions la réplication de ses instruments et de ses expériences.

0. Un patronyme célèbre, un personnage peu connu

Ce physicien, qui semble avoir eu une position institutionnelle et scientifique importante à son époque, n'a laissé que peu de traces dans l'histoire des sciences actuelle. Le fait que sa famille ait occupé les mêmes fonctions pendant trois générations, dont il représentait la deuxième, et que le nom de Becquerel ait été présent dans la recherche scientifique française pendant un siècle et demi efface les histoires individuelles de certains au profit de l'histoire de la lignée. Si l'on considère que deux des membres de cette « dynastie » ont, de plus, joué un rôle essentiel dans la

reconnaissance internationale de la recherche française, on peut expliquer le peu de place qui est accordée à Edmond Becquerel. Son père Antoine César Becquerel est un personnage important de la communauté scientifique française du début du XIXe siècle. Il a obtenu la médaille Copley de la société royale de Londres. Son fils, Henri Becquerel, a obtenu en 1903 le prix Nobel de physique, associé à Pierre Curie pour ses travaux sur la radioactivité. Ces deux générations, l'une le précédant, l'autre le suivant, ayant atteint un tel niveau de reconnaissance scientifique, toujours honorées régulièrement à chaque date anniversaire, ont probablement évincé la génération intermédiaire, représentée par Edmond Becquerel. La glorification des découvertes de son père et de son fils s'est faite aux dépens de la valorisation du travail d'Edmond Becquerel.

La stratégie mise en œuvre par César Becquerel afin de construire cette dynastie a conduit chaque génération de Becquerel à succéder à la précédente, dans les mêmes positions institutionnelles. Lorsqu'Henri Becquerel reçoit le prix Nobel de physique il occupe donc les différentes fonctions qu'occupait son père précédemment. La reconnaissance que cela lui a apporté a probablement eu un impact sur la politique d'archivage des institutions dans lesquelles il occupait ces fonctions, qui se sont chargées de conserver la plus grande partie des manuscrits, des ouvrages et des notes d'Henri, accordant probablement moins d'attention à ceux d'Edmond. Les documents le concernant ont pour la plupart été perdus aujourd'hui. Ceux dont nous disposons ont été protégés parce qu'ils figuraient dans les papiers personnels de César ou d'Henri Becquerel.

L'étude du travail d'Edmond Becquerel que nous avons menée s'est donc principalement appuyée sur les textes publiés. La forme et le contenu de ses travaux traitant principalement, pour l'époque qui nous concerne, de la construction d'appareils, et d'expérimentations menées à l'aide de ceux-ci, nous avons été naturellement conduits à aborder cette recherche en portant un regard sur la réalisation technique de ceux-ci. Nous en analysons la conception, l'utilisation, et les résultats, ainsi que les modifications successives apportées à chacun d'eux par Edmond Becquerel.

Nous identifions principalement deux paramètres qui ont contribué à la modification de ces appareils et lui ont permis d'aboutir à la construction de l'actinomètre électrochimique. Le premier est sa grande maîtrise d'une technique toute nouvelle, la photographie. Nous pensons que c'est la connaissance de ces procédés qui lui permet de les utiliser et de les détourner afin de les employer pour développer des

appareils permettant l'analyse de la lumière. Le second est la controverse qui s'installe entre Jean-Baptiste Biot et Edmond Becquerel concernant le fonctionnement de ceux-ci. Cette controverse qui porte apparemment sur un différend concernant les procédures expérimentales, semble cacher en réalité un désaccord plus profond. C'est le débat sur la nature de la lumière, qui oppose à l'époque les défenseurs de la théorie corpusculaire newtonienne aux défenseurs de la théorie ondulatoire fresnelienne. Le débat entre ces deux hommes s'inscrit donc dans une controverse beaucoup plus large, et bien identifiée. Afin de réaliser les investigations nécessaires à l'analyse de ce cas, nous avons été conduits, en plus de l'exploitation des sources imprimées sur le sujet, à répliquer les instruments et les expériences réalisés par Edmond Becquerel.

1. Période étudiée

Nous nous intéressons dans ce travail aux recherches qu'a menées Edmond Becquerel au début de sa carrière. Nous étudions en particulier les travaux expérimentaux qu'il a conduits entre 1839 et 1843 sur la nature de la lumière. Nous analysons quelles compétences il a dû mobiliser pour réaliser ses recherches et quels facteurs ont influencé l'évolution de ses investigations. La période que nous étudions débute donc avec les premiers travaux de recherche d'Edmond Becquerel, en 1839. Elle s'achève, pour ce qui concerne l'analyse systématique des publications, en 1843, avec la dernière publication traitant de résultats de recherche menés par Becquerel avec l'actinomètre électrochimique. Nous utilisons toutefois de nombreuses publications de cet auteur postérieures à cette période, afin de préciser et de compléter notre recherche.

2. Objectif : reconstruire le processus d'invention de l'actinomètre électrochimique, élucider les termes du débat qu'il suscite

L'objectif central du travail présenté ici concerne la réalisation par Edmond Becquerel d'un appareil, qu'il nomme actinomètre électrochimique, grâce auquel il a pu apporter des preuves de la nature lumineuse des ultraviolets. Notre travail est centré sur l'analyse de la réalisation de cet appareil, de son utilisation, et de l'exploitation de ces résultats. Il s'agit pour nous de tenter d'identifier des éléments permettant de comprendre la démarche qui a conduit Edmond Becquerel à cette réalisation, en essayant de cerner les facteurs favorisant la progression de son travail et l'obtention des premiers résultats.

Il s'agit ensuite de tenter de comprendre comment ont pu être perçus ces résultats par la communauté scientifique de l'époque, en analysant la portée de ceux-ci.

Nous abordons tout d'abord les questions posées sous l'angle de la réalisation technique, d'une part en analysant les publications qu'il produit décrivant ses travaux et d'autre part par la reproduction des expériences qu'il a mises en œuvre.

Nous entendons par « réalisation technique » les différents éléments permettant la construction finale des appareils étudiés ici. Cette réalisation comprend la conception, la concrétisation matérielle, la mise à l'épreuve, les résultats et les modifications qu'il apporte en fonction des besoins ou des artefacts de fonctionnement. Nous réalisons ce travail pour les trois appareils étudiés ici, puisque la conception de chacun d'entre eux découle de l'utilisation et des limites du précédent. De plus cette réalisation n'aurait pu se faire sans un transfert de technologies, depuis la photographie naissante vers le milieu de la recherche scientifique. Cette analyse nous permettra de mettre en évidence les relations entre les différents éléments de théories chimique et physique et leurs utilisations ainsi que leurs applications en vue de la construction de cet appareil.

Plusieurs éléments que nous développerons dans ce texte nous amènent à porter d'abord un regard axé sur les aspects purement techniques. C'est en effet la seule porte d'entrée dont nous disposons pour accéder à l'œuvre d'Edmond Becquerel et au sens qu'il lui donne, puisque son travail présente très peu de contenu théorique. Nous nous intéressons, de plus, à la réalisation d'appareils par Edmond Becquerel. Enfin, les procédés photographiques jouent un rôle important dans le travail de Becquerel, et c'est par l'analyse technique que nous pourrons identifier ce rôle.

Ce choix de l'approche technique est rendu nécessaire pour plusieurs autres raisons. D'une part les travaux que nous analysons, réalisés par Edmond Becquerel, ont été possibles par la réalisation d'appareils dont le dernier qui nous occupe, l'actinomètre électrochimique, a apporté des résultats important concernant la nature de la lumière. Nous pensons que ce sont le mode de réalisation même de ces appareils et leurs principes de fonctionnement qui ont permis d'obtenir ces résultats.

D'autre part, les principes de fonctionnement de l'actinomètre électrochimique sont directement liés à une technique nouvelle de l'époque, le Daguerréotype. L'usage qu'en fait Edmond Becquerel dans ses recherches scientifiques, comme nous le verrons au cours de ce texte, est essentiellement technique. S'il pratique effectivement la daguerréotypie en amateur dès la publication de ses procédés et développe dans cette

activité une démarche esthétique, ou artistique, l'usage qu'il en fait dans ses recherches sur la nature de la lumière est purement technique. Il en utilise les principes chimiques et les procédés de préparation, mais s'affranchit complètement de l'obtention d'image, et donc d'une quelconque considération esthétique. Ces différents points nous amènent à considérer dans ce travail la photographie uniquement sous un angle technique, ignorant ainsi les autres dimensions essentielles de cette invention, mais peu influentes pour les questions qui nous concernent. En effet, elle a été inventée et développée par des hommes possédant très peu de connaissances scientifiques théoriques, mais une maîtrise importante des procédés et des techniques de manipulation. C'est en adoptant ce point de vue que nous choisissons de les qualifier de techniciens, et que nous traiterons la photographie, et les procédés qui en découlent, comme purement techniques. Il est certain que l'usage et la pratique qu'en ont les scientifiques modifient rapidement ce caractère. Mais dans la période qui nous concerne ici débutant en 1839, année de la diffusion des procédés photographiques, cette pratique n'est pas encore répandue chez les scientifiques.

Ensuite nous abordons cette recherche en analysant les influences sociales, tant du point de vue de la communauté scientifique que d'un point de vue plus large. En effet, comme nous venons de le signaler, l'apparition de la photographie influence de manière considérable la société de l'époque, en suscitant l'intérêt immédiat d'une partie de la population. En particulier, elle éveille la curiosité de la partie la plus bourgeoise, disposant de moyens importants, puisque les procédés concernés sont extrêmement onéreux. Edmond Becquerel appartient à la classe bourgeoise parisienne et vit dans un milieu informé des nouveautés techniques, puisque scientifique. Il a 18 ans au moment de la publication des procédés daguerréotypes. Il est de ce fait immédiatement informé de ceux–ci, et se passionne pour eux. Il est sensible que le contexte socio-économique joue de ce point de vue un rôle majeur dans les travaux qui suivront, puisque, comme nous l'avons déjà dit, et allons tenter de le montrer, sans cette grande compétence en photographie, Becquerel ne serait pas parvenu aux résultats qu'il a pu établir.

La position sociale d'Edmond Becquerel joue donc un rôle important dans la réussite de ses travaux. Elle occupe une place d'autant plus importante dans la démarche qui le conduit à la réalisation de ces appareils et aux résultats que nous analysons que sa situation familiale lui impose d'assumer un héritage à la fois social et scientifique lourd.

Celui-ci conditionne en partie la démarche qu'il développe et les moyens qu'il met en œuvre pour évoluer dans la communauté scientifique de son époque.

Le contexte socio-scientifique joue lui aussi un rôle dans ces travaux. En effet, la période que nous étudions correspond à la fin du débat scientifique concernant la nature de la lumière, opposant les défenseurs de la théorie newtonienne corpusculaire de la lumière, aux militants d'une théorie ondulatoire, proposée par Fresnel. Ce débat prendra officiellement fin en 1849 avec l'expérience de Foucault invalidant la théorie corpusculaire au bénéfice d'une conception ondulatoire de la lumière. Mais en 1839 déjà, la grande majorité de la communauté scientifique s'accorde, sur des arguments d'efficacité, à considérer la théorie ondulatoire comme correcte. Certains scientifiques pourtant persistent dans la défense indéfectible du modèle corpusculaire. C'est le cas d'un personnage central dans la communauté scientifique de l'époque et dans le débat qui nous concerne : Jean Baptiste Biot. Le positionnement de ce physicien est d'autant plus important ici, que sa position newtonienne est directement liée à son appartenance à un courant de pensée central dans la France scientifique du début du 19^{ième} siècle, puisqu'il appartient dès sa fondation à la société d'Arcueil.

Afin de comprendre le cheminement intellectuel d'Edmond Becquerel, lors des cinq premières années de sa carrière de chercheur, nous avons choisi d'analyser et d'étudier de manière détaillée la progression et l'évolution des réalisations qu'il met en œuvre. Cette étude porte en partie sur l'analyse des appareils qu'il utilise pour effectuer ses recherches.

Nous pensons que cette étude peut permettre d'apporter des éléments de réflexion sur sa pratique et ses objectifs pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les instruments utilisés par Edmond Becquerel lors de ses investigations concernant la nature de la lumière sont originaux. Ne disposant pas d'outils efficaces et fiables pour répondre à son questionnement, il est dans l'obligation de les imaginer, de les concevoir, et de les réaliser lui-même. Les moyens mis en œuvre pour y parvenir peuvent alors nous indiquer de manière précise les questionnements sous-jacents aux démarches explicitées par lui dans ses publications.

Ensuite, l'étude de l'évolution des améliorations successives, et des changements radicaux de méthodes peuvent nous permettre d'identifier certaines difficultés, d'ordre simplement technique parfois, mais pouvant présenter une dimension théorique implicite, que les contenus textuels ne mettent pas en évidence. Ainsi, les choix

d'orientations de recherche et les choix des techniques employées pour obtenir des résultats exploitables peuvent nous permettre d'identifier des points clés dans les raisonnements, implicites dans les textes. L'analyse de ces choix techniques fait parfois apparaître des positionnements théoriques concernant la nature de la lumière. Enfin, l'évolution technique des appareils, et les artefacts qu'ils mettent en évidence, ou génèrent par leur réalisation ou leur fonctionnement, permettent de mettre au jour des liens entre les différents domaines de recherche d'Edmond Becquerel, dans la période étudiée, et parfois sur une durée plus longue. La compréhension des techniques employées et de leurs artefacts, ou de leurs imprécisions, nous amènent parfois à construire des liens entre différentes périodes d'activité scientifique de Becquerel, et entre différentes questions de recherche, apparemment sans lien visible. Ces liens apparaissent alors, éclairés par un point de vue technique.

L'analyse du débat qui s'instaure avec Jean-Baptiste Biot permet également de saisir le positionnement théorique d'Edmond Becquerel et son évolution au cours de la période étudiée, concernant la nature de la lumière.

Nous présenterons dans ce texte principalement trois appareils, dont certains peuvent être identifiés comme de simples évolutions du précédent, mais dont les particularités nous conduisent à identifier leur existence comme en étant distincte.

Outre l'analyse des publications de Becquerel, nous utilisons dans ce travail, pour parvenir à réaliser l'étude de ces appareils et de leurs évolutions, deux outils de natures très différentes, rarement associés dans les travaux en histoire des sciences : l'analyse de controverse, d'une part, la réplication d'instruments et d'expériences d'autre part. Ces deux outils d'investigation sont, selon Dominique Pestre[1], difficilement associable dans une étude puisque lorsque l'analyse de controverse doit être réalisée en se gardant de tout anachronisme, l'activité de réplication l'impose. Leurs usages croisés s'est ici avéré efficace.

[1] Pestre, D. (1994). La pratique de reconstitution des expériences historiques, une toute première réflexion. Restaging Coulomb: usages, controverses et réplications autour de la balance de torsion. C. B. a. M. Dörries. Firenze, Leo S. Olschki**:** 17-30.

3. Méthodologie : de l’étude des textes à la réplication

Nous développons dans notre travail plusieurs axes d’analyse, qui nous servirons d’outils pour comprendre les recherches et les résultats d’Edmond Becquerel. Nous essayerons dans la mesure où cela est possible de les dissocier afin de rendre la lecture plus simple. Toutefois il est bien évident que ces axes d’analyses s’entremêlent, et parfois se confondent, ne permettant plus de les dissocier.

Les outils que nous utilisons pour cette étude sont de plusieurs types. Tout d'abord ils consistent en une analyse précise des publications d'Edmond Becquerel pour l'époque concernée. Celle-ci peut nous permettre d'identifier les particularités techniques et les implications théoriques présentes dans ces appareils et dans les résultats qu'ils apportent.

Nous utilisons de plus la réplication des expériences qu'il met en œuvre et la reconstruction des appareils étudiés. L'utilisation de ces instruments reconstruits nous permet de reproduire une partie des expériences qu'il réalise afin de comprendre plus précisément leurs caractéristiques techniques et leurs spécificités d'utilisation. La réplication permet de faire apparaître des éléments spécifiques masqués dans les publications. Elle permet aussi de comprendre la complexité et les difficultés de manipulation de ces appareils. Elle rend également possible l'identification de procédures ou de gestes particuliers dont la pratique, courante à l'époque, s'est perdue.

Ces deux outils nous permettent d'approcher de manière plus précise la réalisation technique et l'utilisation des différents appareils développés par Edmond Becquerel.

Afin de comprendre les implications théoriques que les travaux d'Edmond Becquerel peuvent contenir, sans qu'il en soit fait mention dans ses publications, nous avons choisi d'exploiter un outil particulier, dont l'usage est courant en histoire des sciences, l'analyse de la controverse scientifique qu'ils génèrent. Une controverse de ce type se déroule en effet, entre Edmond Becquerel et Jean Baptiste Biot, dès la publication des travaux du premier dans les comptes-rendus de l’Académie des sciences. Nous pensons que l'exploitation de celle-ci, en tentant d'en cerner l'objet réel et les implications, peut nous permettre d'accéder à des informations que ces deux auteurs n'explicitent pas. Cerner l'objet du désaccord en tentant de comprendre le sens que donne chacun des auteurs à ces travaux, et les implications qu'ils leur supposent,

peut nous permettre d'accéder à des données que les publications ne mentionnent pas. Cette analyse nous amène en particulier à émettre l'hypothèse que le désaccord qui génère cette controverse porte en réalité sur la question théorique de la nature de la lumière.

Il nous faudra pour réaliser cette étude définir de manière précise ce que nous entendons par les termes expérience, réplication et controverse. Il ne s'agit pas dans ce travail de construire de nouveaux outils philosophiques permettant l'analyse de la situation. Nous utiliserons les éléments de théories développées par plusieurs philosophes des sciences, qui nous semblent efficaces pour la compréhension de celle-ci. La présentation que nous faisons de ces différents concepts n'aura donc pas comme objectif l'exhaustivité, elle nous permettra seulement de développer les dimensions de ces concepts qui nous seront utiles pour l'analyse du travail d'Edmond Becquerel. Nous ne souhaitons pas prendre position dans les débats qui opposent plusieurs des auteurs que nous utilisons. Certaines dimensions de leurs réflexions nous apparaissent pertinentes pour qualifier de manière plus précise le rôle et la fonction qu'attribue Edmond Becquerel à l'expérience, et pour analyser la controverse que celle-ci génère.

Les concepts développés par les auteurs que nous étudions sont selon nous pertinents et efficaces pour les cas auxquels ils se réfèrent. Il nous faudra parfois élargir certaines des caractéristiques des définitions développées afin de pouvoir expliquer spécifiquement la situation étudiée ici. Il nous faudra aussi associer certains éléments de ces théories alors que les auteurs eux-mêmes semblent les considérer comme exclusifs les uns des autres. Nous ne positionnons pas pour autant notre point de vue comme exemplaire. Il s'agit ici d'une démarche pragmatique dont le sens et les objectifs semblent pouvoir être justifiés par l'usage même que nous en faisons.

4. Hypothèses de travail, questions de recherche

Le travail que nous développons ici est donc basé sur plusieurs hypothèses. Tout d'abord nous pensons qu'il est possible, par l'analyse de la réalisation technique et de l'utilisation d'un appareil, d'identifier les arrière-plans théoriques et les implications sur lesquels celui-ci est construit. De plus cette analyse peut, selon nous, permettre de mettre en évidence l'existence de transfert de connaissances ou de technologie d'un domaine vers un autre, ici du monde technique de la photographie vers le monde

scientifique. Ce transfert, parfois invisible dans les publications, peut apparaître lorsque l'on doit reproduire les expériences concernées.

Ainsi, il nous semble possible d'extraire par l'activité de réplication des informations concernant le sens et le rôle des expériences répliquées, indisponibles dans les publications qui les décrivent. La compréhension des difficultés de réalisation de celles-ci, de leurs spécificités techniques, la recherche des gestes et des organisations efficaces, ou simplement l'identification d'attitudes de manipulation inefficaces peut, selon nous, permettre de comprendre différemment certains éléments de texte ou certaines oppositions faites à ces textes.

Ensuite nous pensons que l'étude d'une controverse scientifique peut permettre, en plus de la compréhension profonde de l'objet de celle-ci, de faire apparaître des implications masquées dans l'exposition des faits et des résultats. La recherche du sens que donnent les protagonistes d'une controverse à l'objet débattu peut amener à en cerner des dimensions invisibles par l'analyse du contenu scientifique seul.

Il paraît difficile de certifier la valeur de ces hypothèses. Nous les justifions en faisant référence à divers auteurs développant sur ces concepts des positions spécifiques. Nous pensons que l'usage que nous en faisons ici les rend pertinentes pour le cas étudié. Il ne s'agit pas pour nous de débattre de leur efficacité dans toute situation particulière que pourrait offrir l'histoire des sciences. Nous nous concentrons sur leur utilisation pour l'analyse de l'invention de l'actinomètre électrochimique par Edmond Becquerel. Les références que nous utilisons pour expliquer ces choix semblent montrer que l'utilisation de ces hypothèses dans d'autres situations a pu être efficace. Cependant les spécificités d'emplois que nous impose l'étude de ce cas nécessite d'adapter chacun des concepts employés à la situation concrète. Il nous semble donc que leur transfert complet à d'autres cas ne peut se faire sans ces adaptations.

Notre travail n'est donc pas ici de développer des idées générales et définitives concernant la pratique scientifique et la manière dont se déroulent les découvertes, mais de permettre l'élargissement de certaines de ces idées par leur application à une situation réelle différente de celle sur laquelle elles ont été construites.

Pour résumer, nous pouvons dire que les questions auxquelles nous souhaitons répondre sont les suivantes :

-comment évolue la construction d'un appareil, quelles étapes nécessite cette construction ?

-quels facteurs permettent cette évolution ?
-comment se déroule la migration de compétences du domaine technique vers le monde scientifique ?
-comment aborder le contenu théorique masqué lors de descriptions purement expérimentales ?
-peut-on exploiter une controverse scientifique pour atteindre ce contenu théorique masqué ?
-peut-on réaliser la réplication d'instruments et d'expériences lorsque l'on ne dispose, comme source, que de textes publiés ?
-que peut apporter l'activité de réplication concernant la pratique et la démarche d'un chercheur ?

Ces questions ne seront abordées que sous l'angle spécifique du travail d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843. Nous n'avons pas comme ambition de tirer des conclusions générales de ces investigations. Les approfondir nous permettra d'étudier en détail les recherches de ce dernier et d'analyser sa démarche.

Le texte qui suit est découpé de manière à exploiter séparément, autant que cela est possible, chacune des hypothèses que nous mettons en œuvre. Cependant, les différents éléments que nous considérons comme influençant le parcours d'Edmond Becquerel sont bien sûr liés et difficilement séparables. Il nous faudra donc parfois prendre en compte plusieurs de ces éléments pour appuyer celles-ci. Les outils que nous exploitons nécessitent en effet parfois d'être utilisés simultanément pour donner du sens aux travaux étudiés.

Ce texte, décrivant les recherches que nous avons menées se découpe donc en cinq parties. Le premier concerne le contexte historique et scientifique de l'époque concernée et la biographie d'Edmond Becquerel. Cette partie nous permet de situer, dans un contexte scientifique particulier, sa formation scientifique. Il est en effet en charge de l'héritage social et scientifique familial et se doit d'honorer cet héritage. La formation à la recherche qu'il reçoit lui est essentiellement donnée par son père qui défend l'idée d'une physique expérimentale. La photographie qui vient de faire son apparition joue aussi un rôle essentiel. Lorsque le procédé est divulgué à l'Académie des sciences, Edmond Becquerel n'a que dix-huit ans. Une telle découverte ne peut le laisser insensible. Elle jouera un rôle important dans ses travaux.

Le second chapitre est un exposé chronologique le plus objectif possible des expériences que mène Edmond Becquerel, à l'aide de ses appareils successifs. Ceci nous permet de faire apparaître l'évolution de ceux-ci, et l'importance que joue la photographie dans cette évolution.

Le troisième chapitre concerne les réplications que nous avons effectuées au laboratoire de ces instruments et des expériences menées à l'aide de ceux-ci. Cette activité de réplications nous a permis de mettre en évidence des points particuliers concernant le travail d'Edmond Becquerel, qui n'apparaissent pas dans ses publications. Nous présentons les difficultés de conception et d'utilisation de ces appareils que nous avons pu rencontrer. Celles-ci sont très rarement présentes dans les résultats publiés dans les communications. Nous avons pu, de plus, mettre en évidence une cohérence entre les différents travaux qu'effectue Edmond Becquerel, cohérence qui n'apparaît pas lorsque l'on analyse seulement la liste de ses publications.

La quatrième partie présente les différents contenus théoriques des travaux d'Edmond Becquerel. Cette partie traite en particulier de l'analyse de la controverse qui se déroule entre Biot et Becquerel, et de ce qu'elle peut nous apporter pour comprendre les positionnements théoriques de ce dernier concernant la nature de la lumière. Nous y étudions aussi l'évolution de ses conceptions au cours des cinq années que dure son travail sur la lumière. Nous y présentons enfin le cadre théorique dans lequel il se place concernant l'électrochimie.

La cinquième et dernière partie de ce travail traite du positionnement épistémologique que nous choisissons pour analyser le travail étudié. Nous y effectuons un bilan des différents mouvements philosophiques concernant le rôle et la fonction de l'expérience en physique, l'activité de réplications, et l'analyse des controverses. Ceci nous permet de délimiter le champ épistémologique de nos investigations et d'identifier les paramètres qui nous semblent pertinents pour l'analyse que nous réalisons.

Première partie :

Eléments biographiques, formation et compétences d'E. Becquerel

Première partie : Eléments biographiques, formation et compétences d'Edmond Becquerel

1. Histoire familiale et enfance d'Edmond Becquerel

1.1. Histoire familiale[2]

Louis Hector Becquerel (1756-1823), le père d'Antoine César Becquerel (1788-1878), c'est-à-dire le grand-père d'Edmond (1820-1891), bénéficie d'un statut politique intéressant et d'une reconnaissance sociale importante dans son département du Loiret, dans lequel il possède des propriétés foncières[3]. Il est en quelque sorte un notable de province. Mais sa position sociale ne lui permet pas de transmettre fortune ou propriété à sa descendance. Il n'est pas un notable fortuné. Il choisit donc pour assurer l'avenir de sa descendance de donner une formation d'excellence à son fils afin qu'il puisse permettre l'ascension sociale de la famille. Il place donc César en pension à Gien, dans le Loiret, à proximité de la propriété familiale dont héritera Edmond, située à Châtillon sur Loing. Il suivra ensuite les cours de l'Ecole Centrale de Fontainebleau, écoles qui, remplaçant les collèges sous la Convention, sont considérées comme des établissements innovants en ce qui concerne leur programme scientifique. César y suit en particulier les cours de mathématiques de M. Billy pour qui il conservera un attachement bien au-delà de la sortie de cette école. Il suit ensuite les cours du lycée Henri IV à Paris en 1805 et 1806. En 1806 il est admis au concours d'entrée à l'Ecole Polytechnique de laquelle il sort 57e en 1808 pour entrer au génie militaire à Metz comme élève sous-lieutenant. Il est certain que la formation que donne Louis Hector à son fils représente un investissement considérable pour un petit notable de province peu fortuné. On estime l'investissement nécessaire à environ 800 F par an. Les sacrifices que fait son père ont pour but de permettre l'ascension sociale de la famille Becquerel, César en est conscient.

[2] La plupart des informations contenues dans ce paragraphe sont issues de « Lemartin de Raspide, S. (2000). Une continuité lignagère: les Becquerels au XIXième siècle et au début du XXième siècle. Histoire contemporaine. Paris, Université Paris IV-Sorbonne**:** 421. pp 177-181

[3] Etre propriétaire foncier permet après la révolution d'acheter un droit de vote, et de se présenter lors des élections locales.

Il est nommé en 1809 lieutenant des sapeurs, puis lieutenant du génie en 1810 et enfin capitaine en 1812. Il commande alors des compagnies de sapeurs dans l'armée d'Espagne sous les ordres du général Rogniat, dans l'armée de Napoléon premier. Il semble développer des ambitions militaires qu'il ne parviendra pas à atteindre. Il rentre en France en 1812 et est nommé sous-inspecteur des études à l'école polytechnique en janvier 1813. Il réintègre l'armée le 1er janvier 1814 afin de mettre en place la défense de Langres et Compiègne. Lorsque le 31 mars l'armée française capitule César demande sa retraite. Il restera attaché toute sa vie à sa vocation militaire[4].

César perçoit dès ce moment une pension de l'armée qui ne semble pas suffisante pour lui permettre de vivre. Il est alors rentier de la terre, il vit modestement des revenus de ses propriétés et de ses bois. Sur les conseils de son cousin Girodet[5], il choisit de se lancer dans l'activité scientifique. Il semble que cette incitation soit motivée par le fait que l'activité scientifique peut, à l'époque, être un bon moyen d'ascension sociale. Il réalise dès lors de nombreuses recherches dans sa maison de Châtillon sur Loing, sur des sujets aussi divers que la cristallographie, et la piezoélectricité. Il publie en 1820 un mémoire intitulé *« développement de l'électricité par la pression et les lois de ce développement* ». Dès lors il poursuivra ses recherches en se concentrant sur l'électricité. Dès 1823 il commence des expériences qu'Henri Becquerel jugera être les expériences fondamentales qui ont établi les lois du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques. En 1824 il concentre son travail sur la pile de Volta et prouve que pour la production d'électricité, il faut toujours un travail moléculaire, soit mécanique, soit physique, soit chimique. En 1829 il rédige un mémoire sur l'électrochimie et l'emploi de l'électricité pour opérer les combinaisons, dans lequel apparaît pour la première fois la description de la pile à deux liquides ou pile à courant constant[6]. C'est cette publication qui lui permettra d'entrer à l'Académie des sciences, dans laquelle il sera élu membre de la section physique générale le 20 avril 1829.

César poursuit ses recherches pendant de nombreuses années sur l'électricité. En 1837 il reçoit de la société royale de Londres la médaille Copley pour la qualité de ses travaux en électrochimie, établissant que toute action chimique peut produire de

[4] Académie des sciences. Dossier César Becquerel, notes d'Edmond Becquerel

[5] Barral, J. A. (1878). Eloge biographique de M. César Becquerel. Paris, Société nationale d'agriculture. On sait peu de chose de ce personnage, souvent cité par César dans sa correspondance. Il semble qu'il s'agisse du célèbre peintre, ayant réalisé les portraits de la famille Becquerel

[6] Il s'agit de la pile connue actuellement sous le nom de « pile Daniell ». Malgré une réclamation en priorité qui attribuera cette découverte à César Becquerel 7 ans avant Daniell, elle ne portera le nom de pile Becquerel que quelques années au XIXième siècle, puis redeviendra la pile Daniell.

l'électricité. C'est ce travail qui servira de base à Edmond Becquerel pour la construction de l'actinomètre électrochimique. En 1838 le muséum national d'histoire naturelle crée la chaire de physique appliquée pour lui et sur ses demandes répétées. Il l'occupe dès cette date. Il demande que cette création soit accompagnée de celle d'un poste d'assistant. Le professeur choisissant traditionnellement son assistant, il est probable qu'il destine déjà ce poste à son fils.

Jusqu'à ce moment la position sociale de César Becquerel n'était ni confortable ni assurée. Lorsqu'il reçoit la chaire de physique appliquée il se doit de pérenniser le fruit de ses nombreuses années de travail et les sacrifices familiaux. Ces considérations conduiront les choix qu'il fera pour ses fils, concernant leur situation sociale et familiale.

1.2. L'enfance d'Edmond Becquerel

César Becquerel aura trois enfants. Alfred naît en 1814, au moment où se termine la carrière militaire de son père, Anne Pauline naît en 1816, puis Edmond en 1820. L'enfance d'Edmond Becquerel est extrêmement mal connue, on sait seulement que ses résultats scolaires étaient excellents puisque son père s'en réjouissait[7]. Étant le cadet de la famille, et surtout le deuxième fils d'une famille bourgeoise du XIXe siècle, ce n'est pas en lui qu'est placé l'essentiel des ambitions familiales. C'est Alfred qui dans un premier temps fera l'objet des projets de réussite sociale de la part de son père. Ce premier fils semble de santé fragile, il souffre d'un bégaiement et a visiblement du mal à se dominer. Il a cependant la volonté et les ambitions que nécessitent les projets familiaux. César écrit à son sujet en 1845 « *tant qu'Alfred sera autant préoccupé de son avenir qu'il l'est maintenant il est impossible qu'il se porte bien. Jamais on ne peut tout faire en même temps. Il faut un peu de modération dans ses ambitions* »[8]. En effet Alfred réalise des études brillantes en médecine. Ce choix de carrière peut sembler curieux puisqu'il n'est pas dans la droite lignée du parcours de son père. Il semble cependant que ce choix soit influencé par la volonté de César qui, d'une part s'est toujours passionné pour la médecine et, d'autre part dispose de relations et d'influences

[7] Lemartin de Raspide, S. (2000). Une continuité lignagère: les Becquerels au XIXième siècle et au début du XXième siècle. Histoire contemporaine. Paris, Université Paris IV-Sorbonne**:** 421. p 189

[8] Ibid. p 69

suffisamment importantes pour espérer permettre à son fils de faire une carrière brillante, dans une profession à l'époque peu avantageuse et souvent mal rémunérée. Il lui faudrait pour atteindre une situation sociale très confortable obtenir un poste de chef de service à l'hôpital, poste qu'il obtient en 1838, avec le soutien d'un collègue et ami de César, membre de l'Académie des sciences, Gilbert Breschet[9].

La carrière d'Alfred sera brillante, puisqu'il est docteur en médecine à 26 ans en 1840, chevalier de la Légion d'honneur en 1845 et agrégé de la faculté de médecine de Paris en 1847. Il répond dans ce sens aux ambitions familiales. Mais cette carrière sera brève puisqu'il meurt en 1862 d'une maladie dégénérative dont à aucun moment on ne trouve la mention précise dans la correspondance de la famille Becquerel. Les symptômes décrits semblent évoquer la syphilis, mais la famille Becquerel ne peut se permettre, étant donnée sa situation et ses ambitions, de reconnaître qu'un des membres de sa famille souffre d'une des maladies les plus meurtrières de l'époque dans le milieu bourgeois[10].

Le rôle que doit jouer Edmond dans la stratégie familiale est donc particulier. Second fils, alors que son frère aîné laisse présager une brillante carrière qui permettra la poursuite de l'élévation du niveau social familial auquel César est attaché, quel rôle peut-il jouer dans ce parcours ? Alfred devenant médecin, César Becquerel doit trouver un héritier pour sa position scientifique et pour lui succéder dans les différents postes que son travail et sa volonté lui ont permis de créer. Il lui faut en particulier un successeur au Muséum. Edmond jouera ce rôle.

Les seules traces que l'on possède sur l'enfance d'Edmond Becquerel concernent son parcours scolaire. En 1835 il est inscrit et suit les cours de Francoeur à l'école polymathique du Collège Bourbon. Il est un élève brillant et la correspondance qu'échange Francoeur avec son père montre que César le destine à une carrière scientifique. Le parcours professionnel d'Alexandre-Edmond Becquerel est donc, très tôt, quasiment tracé.

Il obtient en 1836 le premier prix de mathématiques et premier accessit de physique de ce collège. Il poursuit son parcours studieux en réussissant en 1837 les baccalauréats ès lettres et ès sciences mathématiques[11]. Il passe alors les concours

[9] Ibid. p71

[10] Cette hypothèse est soulevée par S Lemartin de Raspide.

[11] Document non référencé, dossier Becquerel n°1, Archives de la bibliothèque du muséum National d'histoire naturelle, Paris.

d'entrée des écoles réputées dans les formations à caractères scientifiques, et est cette même année reçu au concours d'entrée à l'Ecole Normale. Il en démissionnera immédiatement. L'année suivante, en 1838, il est reçu quarantième au concours d'entrée de l'Ecole Polytechnique. Il en démissionne immédiatement de nouveau.

Nous pouvons nous interroger sur ces deux démissions, et en particulier sur l'intérêt de s'investir dans la préparation difficile de ces concours, pour en refuser ensuite la récompense, c'est-à-dire l'autorisation d'assister au cours qui sont professés dans ces Ecoles. Les opinions de son père sur les formations dispensées dans ces écoles expliquent certainement le refus de suivre ces formations, mais pas l'intérêt de participer aux concours. La place qu'occupent ces écoles dans la communauté scientifique de l'époque le peut. En effet, d'une part un grand nombre de scientifiques, parmi les plus éminents, sont issus de ces écoles. D'autre part, ces chercheurs y enseignent, ou y ont enseigné. Etre accueilli dans ces écoles comme professeur représente une véritable reconnaissance, et témoigne des compétences et des connaissances d'un scientifique. Pour un étudiant, la situation est semblable. Être reçu dans ces écoles et obtenir l'autorisation d'y suivre les cours est la reconnaissance de la qualité, du moins scolaire, d'un étudiant. Il est donc important, même pour César Becquerel que son fils y soit admis. Cela prouve qu'il a la valeur nécessaire pour être un scientifique de qualité. Il n'est pas pour autant nécessaire qu'il y suive les cours et en obtienne les titres. Edmond Becquerel déclarera plus tard qu'il n'avait « pour but que de passer les concours d'admission »[12]. Il démissionne donc deux fois, en application des principes de son père, et devient en 1839 son assistant au Muséum National d'Histoire Naturelle, où César Becquerel occupe la chaire de physique appliquée. Cette même année, il obtient une licence ès sciences physique à la faculté des sciences de Paris.

Devenir assistant de son père présente de multiples intérêts pour lui et pour le parcours familial. D'une part, il pourra recevoir la formation la plus proche des exigences familiales, puisque transmise par son père lui-même. D'autre part, devenir l'assistant d'un professeur, place en excellente position pour une succession éventuelle, lors du départ de celui-ci. Il est donc ici placé, par son père, dans la meilleure situation pour occuper, à son départ, la chaire de physique appliquée au Muséum. César assure ainsi l'avenir professionnel de son fils. Cette pratique, que l'on peut apparenter à du

[12] Document AN F 1720123, dossier Becquerel n°1, Archive de la bibliothèque du muséum National d'histoire naturelle, Paris.

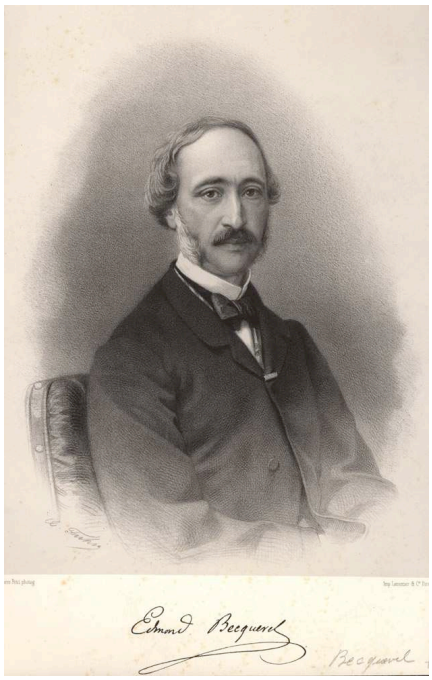
népotisme, sera prolongée par Edmond, qui accueillera quelques années plus tard son fils Henri comme assistant. D'autres scientifiques appliquent ces mêmes méthodes, en particulier au sein du Muséum. On connaît par exemple le cas célèbre de la famille Chevreul, dont plusieurs générations se succéderont aux mêmes postes. Toutefois, déjà à cette époque, cette méthode de recrutement est vue comme une pratique inacceptable, et le ministère de l'Instruction Publique demandera à César, lors de la proposition d'Edmond comme successeur à la chaire de physique, de justifier qu'il est le meilleur candidat à ce poste[13]. Justification évidente, César ne propose pas son fils, mais son assistant, qui est nécessairement le plus compétent pour poursuivre son œuvre.

Cette situation ne positionne pas apparemment Edmond en fils cadet mais en réel successeur de son père. Alfred poursuit l'ascension sociale de la famille mais Edmond n'est pas laissé à part. Il est l'héritier scientifique là où son frère est l'héritier social, puisqu'il prendra possession de la maison familiale de Châtillon. Les ambitions que nourrit César pour la carrière d'Edmond se poursuivront au-delà de sa prise en charge au Muséum. Ils travaillent ensemble, partagent laboratoire et pratiques scientifiques, s'impliquent tous deux dans la progression sociale de la famille. César écrit en 1845, à son épouse « *tu remercieras Edmond d'avoir corrigé avec soin les épreuves de mon mémoire. Dis-lui en même temps de ma part que s'il veut recouvrer la santé, il doit changer de conduite, attendu que sa constitution est altérée par suite des excès qu'il a fait. Il le doit non seulement à cause de lui, mais encore à cause du public qui a les yeux fixés sur lui. Il se trouve dans une position telle qu'il doit s'attirer la considération par tous les moyens possibles* »[14]. Il est donc visible dans cet extrait que l'ambition familiale se poursuit à travers Edmond. Il est l'héritier scientifique et se doit de tenir ce rang. À la mort de son frère, Edmond a 42 ans et devient l'héritier de l'ensemble des objectifs de la famille Becquerel. Ce sera finalement lui le successeur de l'ensemble des propriétés de César, ses enfants devront assumer la poursuite de l'ascension sociale et scientifique de la dynastie Becquerel. Le fils d'Edmond, Henri, poursuivra cette ascension, et obtiendra le prix Nobel de physique aux côtés des Curie.

[13] Lettre de l'Instruction Publique à M. Becquerel, dossier Becquerel n°1, Archive de la bibliothèque du muséum National d'histoire naturelle, Paris.

[14] Cité par Sylvie Lemartin de Raspide, p 77

2. Le personnage social d'Edmond Becquerel



On sait peu de choses du mode de vie d'Edmond Becquerel. Ici comme ailleurs les sources le concernant sont lacunaires. On sait qu'Edmond vivait apparemment avec ses parents, au moins à partir de leur déménagement rue Cuvier, au Jardin des Plantes, et probablement avant. Même après son mariage en 1851 il semble poursuivre cette cohabitation. Il est clair que ce choix du lieu de vie rend plus facile le travail dans son laboratoire du Muséum. Il vit cependant une partie de son temps à Courtenay dans le château familial de son épouse. Peu de choses permettent de cerner son mode de vie. Il semble, d'après les inventaires après décès que dépouille Sylvie Lemartin de Raspide[15], qu'il vive dans un logement à l'allure sévère et plutôt impersonnel, dépouillé de fantaisie ou de décoration. Son mode de vie semble plutôt orienté vers le travail que vers les relations sociales du milieu bourgeois du XIXe siècle. On peut lire ici l'orientation de plus en plus précise et complète d'Edmond Becquerel conditionnée par la recherche de la réussite, aux dépens d'un confort familial.

César semble émettre des opinions et des jugements sur le mode de vie et les choix sociaux de ses enfants. On ne trouve aucune trace de remarques ou de réprimandes de sa part envers Edmond, alors qu'il écrit à sa femme en 1832 au sujet d'Alfred, qui n'a alors que 18 ans à qui il reproche de se rendre deux fois en 15 jours au spectacle « *va-t-il se donner le genre d'aller aux premières représentations et aux pièces nouvelles ! Ce genre ne me convient nullement, tu peux le lui dire* ». Edmond semble s'intéresser beaucoup moins aux relations sociales de son milieu d'origine qu'à son travail. César Becquerel l'encourage même à ne pas épuiser sa santé par le travail.

De la même manière qu'Edmond Becquerel a construit son mode de vie en fonction de ses ambitions scientifiques il construit, comme cela se fait à l'époque, son

[15] Lemartin de Raspide, S. (2000). Une continuité lignagère: les Becquerels au XIXième siècle et au début du XXième siècle. Histoire contemporaine. Paris, Université Paris IV-Sorbonne**:** 421. pp 131-165

mariage en fonction d'objectifs de rang social. La lettre qu'il écrit à son père, après avoir rencontré la jeune fille qu'on lui propose en mariage, témoigne d'une froideur et d'une stratégie assez représentatives à la fois du milieu social de l'époque et des projets familiaux. Il écrit « *sur la demoiselle et Mme sa mère, les données sont favorables* »[16]. La future épouse est choisie par les parents, et par l'intermédiaire d'un notaire afin de contrôler la fortune de sa famille. Ce sont des pratiques courantes à l'époque dans le milieu bourgeois où il vit, les relations d'affection n'étant absolument pas nécessaires au mariage. Edmond épouse donc en 1851 Aurélie Quénard, fille d'un notaire du Loiret, bien dotée et seule héritière des propriétés de ses parents.

On ne connaît presque rien des relations sociales que peut entretenir Edmond Becquerel au cours de sa vie, et en particulier dans la première partie de sa carrière qui nous intéresse ici. Là encore, la perte des archives rend difficile l'interprétation de ces relations et de son mode de vie. La seule source dont nous disposions concerne les quelques lettres qu'Edmond a envoyées à son père, et qui ont été conservées jusqu'à ce jour[17]. Elles laissent apparaître l'image d'un fils respectueux mais qui n'est pas dominé par la stature de son père. César Becquerel est connu pour avoir un fort tempérament. Edmond n'hésite pas à reprocher dans ses courriers à son père certaines de ses erreurs de gestion du domaine familial, par exemple. Cependant cette correspondance est peu abondante et elle aussi lacunaire, puisque l'on ne possède que les lettres d'Edmond et pas les réponses de son père. Dans ces courriers on peut noter l'intérêt et l'attachement que porte Edmond aux propriétés familiales, et l'on voit aussi qu'il s'affirme comme héritier potentiel, en montrant de la fermeté et de la volonté dans les décisions de gestion du patrimoine. Toutefois les relations père-fils, que laissent apparaître ces courriers, ne montrent que très peu de considération affective, et mettent en évidence des relations plutôt autoritaires. La collaboration professionnelle au sein du Muséum entre ces deux hommes se déroulait-elle sur les mêmes bases ? Nous n'avons aucun moyen de l'affirmer mais nous pouvons le supposer.

C'est probablement cette volonté de s'imposer en héritier qui positionnera Edmond comme le successeur scientifique légitime de César Becquerel. Cette succession sera possible et réussie grâce à l'investissement que fera son père dans sa formation. Il le guidera dans ses choix scolaires, permettra son recrutement comme

[16] Cité par S lemartin de Raspide p 25
[17] L'intégralité de cette correspondance a été publiée par S Lemartin de Raspide dans les annexes de sa thèse de doctorat.

assistant au Muséum, et l'accompagnera alors dans sa formation à la pratique scientifique.

3. Une formation scientifique particulière

César a en plus de ces considérations sociales fortes, des considérations scientifiques, méthodologiques d'importance. Il estime en effet qu'il n'est pas possible de travailler dans le domaine de la physique de manière purement théorique, et plus encore, que le travail expérimental, les faits expérimentaux sont primordiaux face aux théories. Pour lui, rien ne sert d'élaborer des hypothèses discutables si elles ne sont pas inspirées par l'expérience. Ce positionnement relève bien sûr de convictions sur la nature de la science, mais aussi des progrès d'une époque. César Becquerel, dans le courant de pensée de son époque, croit que le progrès scientifique peut permettre le progrès social. Il écrit en 1840 à de Juncker, ingénieur des mines « *je consacrerai toute ma vie, s'il le faut, à faire réussir une industrie qui doit exercer une grande influence sur les relations sociales*[18] ». Les écoles, principales pourvoyeuses à l'époque de scientifiques, et en particulier les Ecoles Normales et Polytechniques ne forment pas à ces principes méthodologiques. Elles apprennent, selon lui, à imaginer des hypothèses complexes, à élaborer des théories douteuses, mais ne permettent pas à leurs étudiants d'apprendre à interroger la nature, par l'intermédiaire de l'expérience, ou lorsqu'elles le font, ne le proposent pas comme un principe fondateur de la connaissance scientifique. L'introduction de son traité de physique publié en 1842 le montre. Il y écrit :

« Les théories, à la vérité, servent bien à grouper les faits, pour en faciliter l'étude et en trouver les rapports mutuels ; mais on ne doit y attacher de l'importance qu'autant qu'elles mènent à des découvertes nouvelles. Les théories qui sont infructueuses entre les mains de ceux qui cherchent à les appliquer, et qui sont insuffisantes pour expliquer les faits nouveaux, doivent être remplacées par d'autres plus appropriées aux besoins de la science. Au surplus, mieux vaut une bonne série de faits, bien coordonnés

[18] Cité par S. Lemartin de Raspide p 188

ensemble, qu'une mauvaise théorie, car l'expérience a prouvé depuis longtemps qu'en général les théories passent et les faits restent. »[19].

Ce point de vue, concernant en particulier l'Ecole Polytechnique semble partagé à l'époque par une partie de la communauté scientifique, et est aujourd'hui présenté dans plusieurs travaux concernant cette Ecole[20].

On sait de plus que César Becquerel entretient une correspondance avec Faraday[21], qui travaille sur des questions similaires concernant l'électrochimie. La position que développe Faraday sur l'investigation scientifique est du même ordre que celle de Becquerel. Il considère que la pratique scientifique doit rester attachée aux faits[22].

Ce sont ces considérations qui amèneront Edmond Becquerel à refuser l'entrée aux écoles centrales et polytechniques desquelles il a pourtant réussi le concours. Comme nous l'avons dit précédemment la réussite de ces concours positionne le jeune Becquerel comme un étudiant méritant, et montre qu'un avenir brillant lui est destiné. Il en démissionne pour suivre la voie que lui propose son père, et recevoir une formation scientifique spécifique à laquelle ce dernier est attaché. Il l'appliquera pleinement, puisque son ouvrage intitulé « *La lumière : ses causes, ses effets* », publié en 1867, soit quarante ans plus tard, sera présenté par Edmond lui-même comme un ouvrage « purement expérimental [23]». En devenant en 1839 assistant de son père au Muséum d'histoire naturelle il entre dans un circuit qui lui permettra d'une part de poursuivre les recherches sur l'électricité engagées par son père, et d'autre part de s'assurer un avenir, en s'imposant comme l'héritier du physicien occupant la chaire de physique appliquée du Muséum et non plus seulement comme héritier des charges de son père.

---

[19] Becquerel, A. C. (1842). Traité de physique considérée dans ses rapports avec la chimie et les sciences naturelles. Paris, Firmin Didot.

[20] . BELHOSTE B, " Un modèle à l'épreuve. L'Ecole polytechnique de 1794 au second empire ", *La formation polytechnicienne, 1794-1994*, pp. 9-30, Paris, Dunod, 1994

[21] Blondel, C. (1994). Becquerel Edmond (1820-1891), professeur de physique appliquée aux arts (1852-1891). Les professeurs du conservatoire des arts et métiers, dictionnaire biographique 1794-1955. C. Fontanon and A. Grelon. Paris, Institut national de recherche en pédagogie et Conservatoire nationale des arts et métiers. **1:** 168-182.

[22] Steinle, F. (1994). Experiment, Speculation, and Law: Faraday's analysis of Arago's wheel . 1994 biennal meeting of the philosophy of science association, East lansing, Michigan, Philosophy of science association.

[23] Becquerel, E. (1868). La lumière, ses causes, ses effets. Paris, Firmin Didot Frères, fils et cie.

Le Muséum, à cette époque, jouit d'une réputation internationale importante[24]. Il est cité en 1844, au sein même du British Muséum, comme un exemple permettant d'instituer les modifications indispensables au développement de ce muséum. Cette réputation s'affaiblira très rapidement dans les années qui suivent, avec l'amélioration des autres muséums européens. Cependant, y être recruté en 1838 est une opportunité de s'assurer une reconnaissance internationale rapide.

On ne peut cependant pas considérer Edmond Becquerel comme un simple héritier au sens où il aurait la charge de pérenniser ou de glorifier le travail de son père, leur collaboration professionnelle, quelle qu'en soit la nature, se poursuivra de 1839 à 1878, soit près de 40 ans. Il ne s'agit donc pas pour Edmond de poursuivre une œuvre entamée, mais d'enrichir un patrimoine établi et de valoriser une démarche scientifique spécifique. Il succédera à son père à la chaire du Muséum, à sa mort, mais il aura occupé auparavant d'autres postes tout aussi honorifiques.

4. La carrière d'Edmond Becquerel au delà de la période étudiée

Dès 1838 Edmond Becquerel travaille avec son père dans son laboratoire du Muséum national d'histoire naturelle. Parallèlement à ces recherches personnelles, il collabore à l'écriture des ouvrages que publie son père. Dès cette époque ceux-ci sont cosignés du nom du père et du fils. En 1840 il devient répétiteur de physique à l'Ecole Centrale des arts et manufactures, puis professeur suppléant de Pouillet, membre de son jury de thèse, à la faculté des sciences de Paris en 1844. En 1847 il est pour la première fois suppléant de son père à la chaire de physique du Muséum, suppléance qui se renouvellera plusieurs fois, de plus en plus régulièrement jusqu'à ce qu'il occupe enfin ce poste.

En 1849 est créé à Versailles l'Institut national agronomique. Edmond Becquerel remporte le concours de recrutement pour le poste de professeur de physique et est nommé en 1850 à cette chaire. L'institut agronomique est supprimé en 1852 par l'Empire nouveau issu du coup d'état de Louis Napoléon Bonaparte en 1851, Edmond Becquerel perd donc son poste.

[24] Limoges, C. (1980). The developpement of the Muséum d'Histoire Naturelle of Paris 1800-1914. The organization of Science and technology in France (1800-1914). R. Fox and G. Weisz. Paris, Cambridge**:** 211-240.

Il candidate alors à la chaire de physique appliquée au conservatoire des arts et métiers, chaire libérée par la démission de Pouillet, qui refuse de prêter serment à l'Empereur. Le conseil de perfectionnement du conservatoire semble considérer que les recherches d'Edmond Becquerel jusqu'à cette époque manquent d'originalité, cependant considérant qu'il a fait ses preuves en ce qui concerne l'enseignement en réalisant des suppléances au Muséum, à la faculté des sciences, à l'école centrale et même au conservatoire, il décide de le choisir pour occuper cette chaire. Il occupe donc dès 1852 la chaire de physique appliquée au conservatoire des arts et métiers. Son cours, qui s'étale sur deux années, traite la deuxième année essentiellement d'électricité et de photographie. Ces deux domaines dans lesquels il semble exceller sont ceux qu'il a su associer afin de mettre en œuvre les appareils que nous étudions ici.

Si ses cours du Muséum, plutôt théoriques, attirent peu de public, ceux qu'il fait au conservatoire ont un succès considérable. Plusieurs centaines d'auditeurs assistent à ceux-ci. Un tel succès conduit même l'administrateur du conservatoire à prendre la défense d'autres cours, moins suivis, auprès du ministre de l'instruction publique. Il écrit en effet :

« le nombre des auditeurs n'est pas une mesure précise de l'utilité d'un enseignement, ni même du talent et du zèle d'un professeur : certaines matières, certaines sciences dont l'enseignement est facile à suivre, et pour lesquels des expériences curieuses sont un auxiliaire obligé, offrent en général au public un intérêt de curiosité qui l'attire tandis que des sujets plus sérieux, plus difficiles à traiter et à comprendre, attirent au contraire moins d'auditeurs, sans être pour cela moins utiles, moins important pour l'industrie. »[25].

Malgré l'obtention de ces postes Edmond Becquerel restera l'aide naturaliste de son père au Muséum. Il poursuivra une partie de ses recherches au sein de ce laboratoire. Pourtant lorsqu'il prend ses fonctions au conservatoire, il déplore l'état dans lequel se trouve le laboratoire et le peu de matériel dont il dispose. Il transformera celui-ci, acquerra de nombreux instruments, pour en faire en 1881, au moment de l'exposition

[25] Blondel, C. (1994). Becquerel Edmond (1820-1891), professeur de physique appliquée aux arts (1852-1891). Les professeurs du conservatoire des arts et métiers, dictionnaire biographique 1794-1955. C. Fontanon and A. Grelon. Paris, Institut national de recherche en pédagogie et Conservatoire nationale des arts et métiers. **1:** 168-182.

internationale d'électricité de Paris, l'un des laboratoires les mieux équipés pour les mesures électriques. Il y poursuivra ses recherches sur l'électricité et la phosphorescence dans une démarche purement expérimentale.

Ce n'est qu'en 1878, à la mort de son père qu'il accédera à la chaire de physique appliquée au Muséum d'histoire naturelle. Il restera professeur au conservatoire jusqu'à sa mort en 1891. À cette date c'est son fils Henri Becquerel, jusqu'alors son assistant au Muséum, qui occupera sa place. Ainsi l'héritage qu'il avait la charge de pérenniser et de transmettre incombe à son fils qui poursuivra l'œuvre entreprise.

5. Les compétences spécifiques du jeune Becquerel.

Edmond Becquerel s'intéresse très tôt à une technique toute nouvelle, la photographie. Nous en rappellerons ici les premiers développements.

5.1. Brève histoire de la naissance de la photographie

5.1.1. Apparition et diffusion des procédés

Fixer l'image qui apparaît au fond de la chambre noire, ou «camera obscura», connue depuis des siècles, a été pour une génération d'hommes, l'objet d'une volonté farouche. Dès 1802, Thomas Wedgwood et Sir Humphrey Davy imaginent d'utiliser le chlorure d'argent puis le nitrate d'argent, dont on savait qu'ils noircissaient sous l'effet de la lumière, pour fixer une image. Ils en obtiennent une en mettent en contact une image sur verre avec une couche de substance photosensible, mais ne trouvent aucun procédé pour la fixer et ainsi la conserver. Après de nombreuses tentatives ils concluent que cette étape est impossible et abandonnent leurs recherches dans ce domaine[26].

En 1824, Nicéphore Niepce, après des années d'expérimentations infructueuses, parvient à obtenir une image persistante et conservable en utilisant le bitume de Judée. Cette substance, soluble dans l'essence de lavande, devient insoluble après exposition à

[26] F. Arago, "Le Daguerréotype", *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, séance du lundi 19 août 1839, T.9, p.251-252.

la lumière. Niepce expose donc dans la chambre noire des plaques de cuivre, d'étain ou d'argent recouvertes de bitume de Judée puis les lave avec cette essence. Les zones exposées à la lumière restent couvertes par la substance, les autres laissent apparaître le métal. Il obtient ainsi les premières images conservables, qu'il nomme héliographies (littéralement «dessiner avec le soleil»). Mais l'impression de la plaque héliographique nécessite un temps d'exposition extrêmement long, au moins deux jours, qui fait perdre à l'image l'impression de profondeur[27].

Son association, en 1829, avec Louis Daguerre, célèbre artiste parisien, sera très productive. Daguerre, passionné par l'illusion de la réalité, a créé le diorama, toiles géantes représentant en deux dimensions, de la manière la plus précise possible, le monde réel en trois dimensions grâce à des jeux de lumière. Il utilise pour cela la chambre obscure. L'héliographie ne pouvait le laisser indifférent, puisqu'elle semble permettre de représenter le monde tel qu'il est.

Ils partagent alors leurs connaissances et échangent de nombreuses idées[28]. Niepce lui écrit d'ailleurs le 4 juin 1827 : « *nous occupant du même objet nous devons trouver un égal intérêt dans la réciprocité de nos efforts pour atteindre le but*[29]». Cette réciprocité permet à Daguerre de mettre au point un procédé à base d'iodure d'argent pour l'obtention d'images de qualité très supérieure à celles de Niepce, parce qu'il utilise une optique de bien meilleure qualité. Il nomme lui-même ce procédé le Daguerréotype.

En 1839, Daguerre, en association avec Isidore Niepce, fils de Nicéphore, vend à l'État français l'invention du daguerréotype, contre une rente viagère de six mille francs par an pour lui et quatre mille francs pour le fils de Nicéphore Niepce.

Arago, membre éminent de l'Académie des Sciences, est chargé d'en réaliser la promotion. Il en communique le procédé à l'Assemblée Nationale, à l'Académie des Sciences[30] et à la presse populaire. Rapidement paraît, aux frais de l'Etat, un opuscule intitulé «Historique et description du daguerréotype et du diorama[31]» dans lequel tous

---

[27] J. N. Nièpce, *Notice sur l'héliographie*, Paris, Susse Frères Editeurs, 1839.

[28] L. J. Daguerre, *Historique et description des procédés du daguerréotype et du diorama* , Paris, Susse Frères Editeurs, 1839.

[29] L. J. Daguerre, "Des procédés photogéniques considérés comme moyen de gravure", *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, séance du mardi 30 septembre 1839, t.9, p.423-430.

[30] F. Arago, "Le Daguerréotype", *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, séance du lundi 19 août 1839, t.9, p.250-267.

[31] L. J. Daguerre, *Historique et description des procédés du daguerréotype et du diorama* , Paris, Susse Frères Editeurs, 1839.

les procédés sont expliqués. Dès lors l'ensemble de la société française est informé de l'invention. La daguerréotypie « *est livrée à l'expérience et à l'émulation de tous* [32]». Arago conclut son discours à l'Académie en déclarant que « *cette découverte, la France l'a adoptée ; dès le premier moment elle s'est montrée fière de pouvoir en doter libéralement le monde entier* [33]».

5.1.2. Le procédé daguerréotype

De nombreux procédés photographiques existent, chacun présentant des particularités. Sur métal, sur papier ou sur verre, ces procédés sont tous basés sur la réactivité des halogénures d'argent à la lumière. Nous n'exposons ici que le procédé daguerréotype puisque c'est celui qu'Edmond Becquerel maîtrise. C'est de plus le seul procédé connu en 1839, mis à part le procédé héliographique Niepce, qui est très difficilement exploitable et diffusable.

Les images photographiques obtenues par le procédé nommé daguerréotype se forment sur des plaques d'argent, ou sur des plaques de cuivre recouvertes d'une fine couche d'argent. Pour créer la couche photosensible destinée à recevoir la lumière, on expose ces plaques aux vapeurs d'iode qui se forment spontanément en présence de cristaux d'iode à température et pression ordinaires. Le diiode réagit à la surface de la plaque avec l'argent métallique pour former des cristaux d'iodure d'argent. C'est cette couche très fine de cristal ionique qui réagira sous l'effet de la lumière. Cette préparation doit donc se faire sous lumière jaune ou rouge afin que la plaque ne soit pas impressionnée avant son utilisation par les rayons bleus et violets.

On place ensuite la plaque au foyer de la chambre noire dont l'objectif est couvert. Lorsque l'on découvre l'objectif, l'image qu'il crée se forme sur la plaque. Sous l'effet de la lumière l'iodure d'argent se décompose. Dans les parties éclairées de la plaque, l'iodure d'argent réagit, alors que dans les zones non éclairées il reste à l'état initial.

---

[32] Figuier, L. (1870). La photographie. Les merveilles de la science ou Description populaire des inventions modernes. Paris, Furne, Jouvet et cie éditeurs. **3:** 1-208.

[33] Arago, F. (1839). "Le Daguerréotype." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 250-267.

À sa sortie de la chambre noire, aucune image n'est visible sur cette plaque, il s'agit d'une image latente qui nécessite d'être révélée. On expose alors la plaque, sous lumière jaune ou rouge pour éviter que l'iodure d'argent qui n'a pas encore réagi se décompose, à des vapeurs de mercure. Il suffit pour cela de chauffer légèrement un récipient contenant du mercure liquide placé en dessous de la boîte. Il se forme alors un amalgame blanc entre l'argent métallique qui s'est formé et le mercure. Cette action n'a donc lieu que dans les zones qui ont reçu de la lumière. La plaque daguerréotype présente alors l'image négative de la scène photographiée. Sous un certain éclairage, et vue sous un certain angle, l'image apparaît en positif.

Mais à la surface de la plaque il reste de l'iodure d'argent dans les zones sombres où la lumière ne l'a pas fait réagir. Afin de pouvoir exposer cette plaque daguerréotype à la lumière sans risquer que l'image disparaisse, il faut éliminer ce résidu. On plonge alors la plaque dans une solution d'hyposulfite de sodium qui dissout et élimine l'iodure d'argent correspondant aux zones obscures de l'image.

La plaque peut alors être exposée sans risque à la lumière, et l'image conservée indéfiniment si l'on a soin de la protéger de l'oxydation et des frottements.

Ce procédé, s'il paraît relativement simple dans sa description, présente des difficultés de mise en œuvre. Il est tout d'abord très difficile de conserver des plaques déjà préparées pour les utiliser au moment voulu. Il faut la plupart du temps les préparer peu avant l'usage. D'autre part la fabrication de ces plaques nécessite de travailler dans l'obscurité, ou au mieux à la lumière d'une bougie placée loin de la zone de manipulation. Or les substances manipulées pour la préparation et la révélation, extrêmement volatiles, sont aussi extrêmement toxiques. Les vapeurs d'iode en particulier sont extrêmement dangereuses pour l'organisme. Or il est difficile de structurer un laboratoire pour qu'il soit à la fois obscure et bien ventilé.

Peut-on attribuer une partie des troubles de santé que semble présenter Edmond Becquerel dès 1840 à l'exposition répétée à ces vapeurs ? Il souffre apparemment selon son père de migraines et de troubles respiratoires qui correspondent aux dommages engendrés par la vapeur d'iode.

5.2. Les compétences particulières d'Edmond Becquerel dans le domaine de la photographie

Parmi ceux qui se passionnent pour cette invention, on trouve des scientifiques de renom, tels que Jean Baptiste Biot[34], physicien célèbre pour ses travaux sur la polarisation de la lumière, et d'autres en devenir, comme Edmond Becquerel. Ce dernier, immédiatement intéressé par cette invention, l'expérimente rapidement. Il s'intéresse à la Daguerréotypie, et réalise des vues de Paris, telle qu'une célèbre vue du jardin des tuileries qu'il réalise en 1840. Nous verrons au cours de ce mémoire qu'Edmond Becquerel saura perfectionner le procédé en éliminant la phase très toxique du développement au mercure pour la remplacer par un simple éclairage en lumière rouge qui suffit à révéler l'image.

Fig 1 : Vue du jardin des Tuileries réalisée par E. Becquerel en 1840

[34] J. B Biot, "Persistance de l'excitabilité spéciale, dans les papiers imprégnés de bromure d'argent qui ont été impressionnés instantanément", *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t.12, séance du lundi 18 janvier 1841, p.170-171.

Cet intérêt pour la photographie ne le quittera jamais, il y fera souvent référence lors de ses recherches. Cette compétence particulière orientera même parfois ses travaux dans des directions inattendues.

Il obtiendra en 1848 l'une des premières photographies en couleur, qu'il nomme héliochromie. Il s'agit d'une image en couleurs du spectre solaire obtenu sur une lame d'argent recouverte d'une couche de sous chlorure d'argent[35] violet recuit. Le procédé est assez proche du procédé daguerréotype, puisqu'il s'agit d'un positif direct obtenu sans développement. Il ne parvient cependant pas à fixer cette image, qui disparaît au bout de quelques minutes d'exposition à la lumière[36]. Cette étape est particulièrement intéressante, puisqu'elle montre Edmond Becquerel mettant en relation son travail sur le spectre solaire avec ses compétences en photographie. Le procédé utilisé consistant à recuire une couche de sous chlorure d'argent était déjà employé par lui dans ses travaux sur l'actinomètre plusieurs années auparavant.

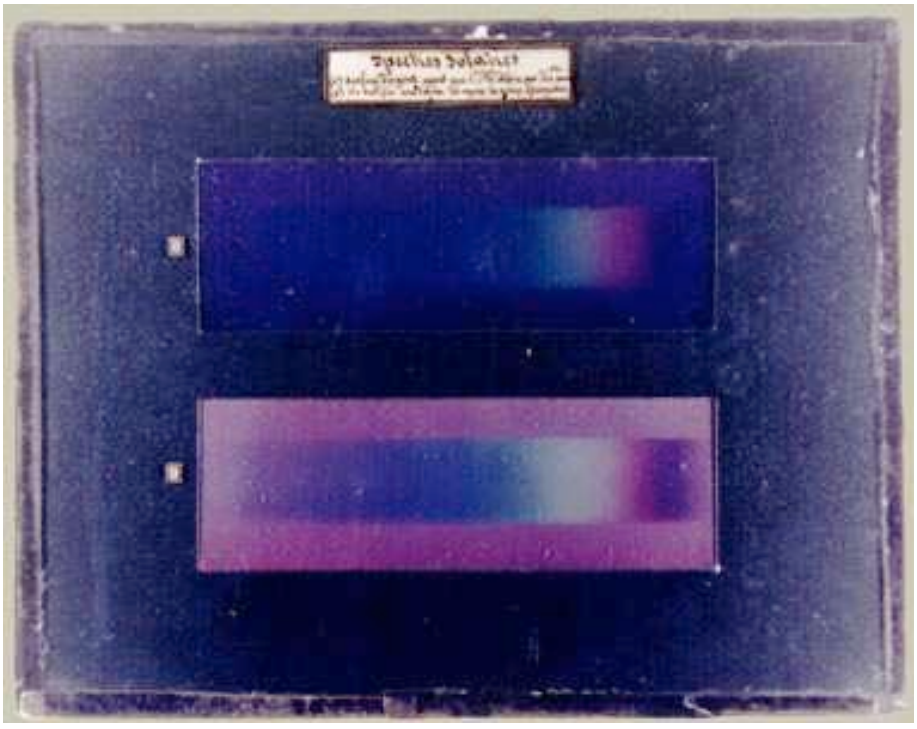


Fig 2 : Daguerréotype en couleur du spectre solaire réalisé par E. Becquerel[37]

[35] Le sous-chlorure d'argent est une appellation de l'époque, utilisée par Becquerel pour désigner un chlorure d'argent partiellement transformé par la lumière.

[36] Pour plus de détail sur l'héliochromie, il est possible de consulter les travaux de Marc Keuren doctorant au centre d'histoire des techniques, au CNAM.

[37] Il semble qu'à l'origine, ce daguerréotype présentait fidèlement les couleurs du spectre. Après un siècle et demi où il a été conservé autant que possible dans l'obscurité, il est essentiellement bleuté.

Il participe à la création en 1851 de la société héliographique, qui s'éteint au bout de quelques mois d'existence, puis à la création de la société française de photographie en 1854 aux côtés d'autres scientifiques tels que Léon Foucault et Victor Regnault, et de photographes dont les noms resteront célèbres tels que Gustave Le Gray et Hippolyte Bayard.

Son intérêt pour la photographie influencera aussi ses recherches en physique puisque dès l'obtention de sa licence, et accompagné dans sa pratique par son père, Edmond Becquerel se lance dans l'analyse des effets de la lumière, et en particulier de la lumière solaire, sur la matière. Il soutient en 1840 une double thèse de doctorat en physique et en chimie à la faculté des sciences de Paris, devant Pouillet, Dumas et Regnault, intitulée " Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière "[38]. Dans ce travail, il cherche un moyen de caractériser physiquement ces effets, et propose, en se basant sur les travaux de son père[39], de les analyser par le moyen des courants électriques. Nous développerons en détail ces travaux dans la suite de ce texte.

6. Contexte scientifique de l'étude de la lumière

6.1. L'idée de mesurer la lumière

Il est très difficile de retracer l'histoire de l'idée de mesurer la lumière. Cette préoccupation apparaît dans des milieux extrêmement divers et pour des motifs très variés, de la raison religieuse à l'intérêt agricole. Trois domaines semblent particulièrement dominer ces premières époques, l'étude de la brillance, de la chaleur radiante et des couleurs.

[38] Becquerel, E. (1840). Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire; thèse de physique présentée et soutenue à la faculté des sciences de Paris en août 1840. Paris, typographie Firmin Didot frères.

[39] Becquerel, A. C. (1832). "Considérations générales sur les changements qui s'opèrent dans l'état électrique des corps par l'action de la chaleur, du contact, du frottement et de diverses actions chimiques, et sur les modifications qui en résultent quelquefois dans l'arrangement de leurs parties constituantes." Mémoire de l'Académie des sciences et de l'institut de France **11**: 317-368.

La première trace que l'on trouve d'une proposition concrète de mesure de la lumière, en particulier de son intensité, est attribuée au moine capucin, François Marie, dans un ouvrage qu'il publie en 1700. Il propose la construction d'une échelle d'intensité en faisant passer la lumière à travers une série de morceaux de verre pour en diminuer l'intensité et analyse cette atténuation sous la forme d'une progression arithmétique[40].

Christian Huygens propose de comparer la lumière du soleil avec celle de Sirius en regardant le soleil à travers un long tube percé d'un petit trou au sommet, en tentant d'égaliser sa luminosité avec celle de Sirius. Pierre Bouguer critique ces résultats en remarquant que les différentes mesures n'ont pas été faites au même moment avec des conditions identiques pour l'œil. Les comparaisons ne sont donc pas valables. Ce dernier propose en 1757[41] un montage dans lequel il compare la luminosité de la Lune avec celle d'une bougie. Dans cet essai il propose que la luminosité de la lumière varie en fonction de la distance de la source selon une loi proportionnelle au carré de cette distance, loi qui semble avoir été énoncée sous différentes formes près d'un siècle auparavant[42]. Les conclusions de Bouguer porte sur le fait que l'œil n'est pas un outil fonctionnel pour mesurer une valeur absolue de la luminosité. Il peut seulement permettre de comparer deux sources lumineuses si on les regarde au même instant dans les mêmes conditions. Pour effectuer ces comparaisons il propose un appareil, qu'il nomme lucimètre, composé de deux tubes dirigés vers les deux sources lumineuses et convergeant vers un écran. À l'aide d'un diaphragme, le manipulateur réduit la luminosité de la source la plus importante jusqu'à atteindre une sensation équivalente pour l'œil qui regarde l'écran, pour chacune des sources. Bouguer consacrera une grande partie de sa vie à ce travail.

En 1794 Benjamin Thompson[43] comte de Rumford construit un photomètre pour mesurer l'intensité de la lumière afin d'étudier la transmission du verre, la réflexion des miroirs et les efficacités relatives des chandelles et des lampes à huile. La technique est sensiblement la même que celle de Bouguer, puisqu'il s'agit de comparer visuellement

---

[40] Johnston, S. F. (2001). A history of light and colour measurement, Sience in the shadows . Bristol and Philadelphia, Institute of physics publishing.

[41] Bouguer, P. (1757). "Remarques sur les moyens de mesurer la lumière et sur quelques applications de ces myens." Mémoire de l'Académie royale des sciences **Centurie II, Tome 15**: 1-35.

[42] Perrin, F. H. (1948). "Whose absorption law?" Journal of the optical society of america **38**: 72.

[43] Thompson, B. (1794). "A method of measuring the comparative intensities of the light emitted by luminous bodies." Philosophical transactions of the Royal society of London **84**: 67-82.

deux sources lumineuses. Mais afin d'éviter l'effet d'éblouissement de l'œil, Thomson se propose de comparer les ombres d'un cylindre mis sur le parcours des lumières issues des deux sources, et non plus les lumières elles-mêmes. Sa technique pour égaliser l'intensité des deux sources consiste à éloigner la plus lumineuse jusqu'à obtenir l'égalité. Il utilise en particulier son appareil pour calculer l'efficacité de différentes lampes à huile.

Fox Talbot[44] propose en 1834 un autre moyen de mesurer l'intensité de la lumière en utilisant cette fois le temps comme unité de mesure. Sa méthode est basée sur la persistance rétinienne. Son appareil est constitué d'une grande roue pleine, perforée en un endroit sur sa circonférence. Une source lumineuse placée derrière cette roue est éclipsée de manière régulière. Il suffit ensuite de trouver la vitesse minimum de rotation de la roue à laquelle on ne voit pas la source clignoter. Plus elle est lumineuse plus le temps qui s'écoulera entre deux apparitions par le trou de la lumière sera long. On peut ainsi mesurer l'intensité lumineuse en utilisant une échelle de temps.

L'ensemble des méthodes employées pour effectuer des mesures sur la lumière sont donc visiblement fondées sur l'utilisation de l'œil comme seul détecteur. Ces mesures sont dépendantes des caractéristiques spécifiques de l'œil humain, et en particulier des limites du spectre qu'il peut capter. Elles sont, de plus, spécifiques à un manipulateur à un moment donné de sa vie, puisque chaque individu perçoit la lumière de manière différente, et que les yeux de chacun se modifient au cours du temps. Les appareils que proposera Edmond Becquerel utilisent pour la première fois un détecteur chimique indépendant des caractéristiques humaines et offrent donc la possibilité de reproduire les mesures effectuées.

6.2. L'analyse du spectre lumineux[45]

Isaac Newton est le premier à obtenir une théorie complète de la décomposition de la lumière blanche en un spectre continu. Il n'est pas question ici pour nous de revenir sur son travail, nous dirons simplement qu'à aucun moment il n'a pu observer de

[44] Talbot, F. (1834). "Experiments on light." Philosophical magazine **5**: 321-334.

[45] Hentscel, K. (2002). Mapping the spectrum, technique of a visual representation in research and teaching. Oxford, Oxford university press.

raies sombres dans le spectre solaire. C'est en 1802 que pour la première fois Wollaston observe des raies noires dans le spectre solaire. Il les attribue aux limites des couleurs de ce spectre, et considère ces raies noires comme la marque de séparation entre deux couleurs.

Indépendamment, Joseph Fraunhofer identifie ces raies en 1814. Il utilise pour cela un prisme et des lentilles d'extrêmement bonne qualité qu'il a appris à fabriquer, puisqu'il est un excellent opticien et fabricant d'instruments reconnu. Fraunhofer observe un total de 574 raies dans le spectre visible, et publie une carte du spectre mettant en évidence plus de 350 de celle-ci. Il identifie les principales d'entre elles par des lettres de A à H. Ces repères serviront encore lors du travail d'Edmond Becquerel afin de se positionner dans le spectre solaire.

Les découvertes de Fraunhofer se répandent rapidement et sont traduites en 1823 en français et en anglais. Dès ce moment, l'idée que les raies noires dans le spectre solaire correspondent aux raies lumineuses dans les flammes commence à attirer l'attention des chercheurs, de manière sporadique entre 1820 et 1860. En 1822 John Herschel décrit le spectre prismatique de certaines flammes telles que celles du nitrate de cuivre et de l'acide borique. Fox Talbot publie en 1826 un article dans lequel il décrit les spectres du sodium, du potassium et du strontium placés dans une flamme, pour lesquels il identifie une seule raie lumineuse par réactif, mais différente pour chacun. De nombreux scientifiques s'intéresseront à cette question, mais il faudra attendre 1861 pour que Bunsen et Kirchhoff propose la technique des spectres de flammes comme moyen d'identification de la composition d'une substance.

Là encore et jusqu'au travail de Kirchhoff, l'analyse du spectre lumineux et l'identification des raies se fait en utilisant, comme détecteur de la présence ou de l'absence de lumière dans le spectre, l'œil humain. C'est un réel problème qui sera identifié à l'époque. Charles Babbage rapporte en 1824 ces propos de John Herschel, que nous traduisons :

« J*e vais préparer l'appareil et te mettre dans une position telle qu'elles -(les raies)- seront visibles, tu pourras alors les chercher et ne pas les trouver : après cela tu te remettras dans la même position et je t'apprendrai comment les voir, et tu pourras les*

voir, et tu ne voudras plus croire que tu ne pouvais pas les voir avant, tu penseras sûrement que c'est impossible de regarder un spectre sans les voir »[46].

L'appareil d'Edmond Becquerel, destiné à l'analyse du spectre solaire, et qui lui permettra dans un premier temps de vérifier la position de plus de 500 des raies de Fraunhofer, n'utilise pas l'œil comme détecteur, et résout donc ce problème de l'interprétation de la perception et de la limite de l'œil humain. Cette spécificité est d'autant plus importante que l'actinomètre électrochimique permettra de mettre en évidence des raies sombres dans la zone ultraviolette du spectre, que l'œil humain est incapable de détecter.

Conclusion :

La situation dans laquelle se trouve Edmond Becquerel en 1838 lorsqu'il débute son travail de recherche est donc particulière. Sa situation familiale l'incite à avoir de grandes ambitions de carrière afin de pérenniser à la fois le patrimoine personnel de la famille et le patrimoine scientifique. Il se doit de poursuivre le travail débuté par son père et d'ancrer le nom des Becquerel dans l'histoire des sciences. Son apprentissage de la pratique scientifique, réalisé aux côtés de son père, le situe dans la catégorie des expérimentateurs peu enclins au développement de théories, et très attachés aux faits.

L'époque joue un rôle essentiel dans l'orientation que prendront ses travaux. L'apparition de la photographie et l'intérêt qu'il lui porte conduiront ses recherches vers l'analyse de la lumière et l'utilisation de substances photosensibles. La formation que lui a donnée son père et la grande maîtrise qu'il a de ses travaux l'amènent à se consacrer à l'étude de l'électrochimie. La combinaison de ces deux préoccupations lui permettront d'inventer l'actinomètre électrochimique et d'aboutir aux résultats que nous décrivons dans ce travail.

Les techniques employées à l'époque pour caractériser la lumière et analyser le spectre présentent des limites qu'Edmond Becquerel saura franchir en mettant à contribution la diversité de ses compétences. L'actinomètre électrochimique qu'il construit et utilise sera le premier appareil permettant l'analyse du spectre solaire en

[46] Babbage, C. (1830). Reflexion on the decline of science in England, and some of its causes. London, Fellowes.

utilisant un autre détecteur que l'œil humain. Les substances photosensibles, étudiées au moyen des courants qu'elles produisent lorsqu'elles réagissent sous l'effet de la lumière, seront utilisées par lui comme le premier détecteur de lumière indépendant du facteur humain.

Seconde partie :

Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière

Seconde partie : Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière

Les expériences que nous présentons dans cette partie sont celles qu'Edmond Becquerel réalise entre 1839 et 1843. La description que nous en donnons tente de rester au plus près des textes qu'il publie. Nous essayerons donc, dans la mesure du possible, d'éviter toute interprétation.

Il est possible cependant que certains éléments de sa démarche nécessitent d'être explicités au-delà de ce que fait Edmond Becquerel lui-même. Dans ce cas nous tenterons de séparer précisément ce qui provient des publications d'Edmond Becquerel des informations que nous produisons afin d'en expliciter le contenu. La description que nous faisons dans cette partie se veut strictement chronologique, toutefois les délais de parution des mémoires qu'il publie étant bien supérieurs aux délais de parution des communications à l'Académie des sciences dans les comptes rendus, certains documents que nous utilisons pourront paraître arbitrairement employés. C'est l'exploitation des informations contenues dans ces publications, qui peut permettre d'identifier une chronologie dans le travail d'Edmond Becquerel, parfois masquée par ces délais de parution.

Le tableau synthétique des publications d'Edmond Becquerel que nous étudions peut permettre d'aider à la bonne compréhension de l'approche chronologique que nous faisons. Il montre que la communication des extraits de mémoires à l'académie devance de plusieurs mois la publication de ces mémoires in extenso. Ce délai de quelques mois peut paraître court, mais la période sur laquelle se déroulent les expériences étudiées est brève, et le rythme des communications d'Edmond Becquerel, ainsi que le rythme des réponses de Jean-Baptiste Biot, à cette époque, donnent à ce délai une importance bien plus grande. Ce tableau ne présente en effet pas seulement les publications d'Edmond Becquerel, mais aussi les réponses, commentaires et critiques de Jean-Baptiste Biot. Ces publications ont ceci de particulier que chacune d'elles appelle quasi-immédiatement une réplique de ce dernier, qui entraine souvent à son tour une réponse de Becquerel. Nous avons ainsi, sur une période très courte, un dialogue entre deux scientifiques, que nous analysons plus loin comme un exemple de controverse scientifique, sur un sujet particulier et bien défini.

Tableau synthétique des communications et publication analysées :

Année	Date de la communication	Publication dans les comptes-rendus de l'Académie des sciences	*Publications des mémoires in-extenso*
1839	Lundi 30 juillet 1839	**Becquerel, E**. (1839). "Recherche sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 145-149.	
	Lundi 5 août 1839	**Biot, J.-B.** (1839). "Remarque de M.Biot sur note lue par M. Becquerel." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 169-172.	
	Même séance	**Becquerel, César.** (1839). "Réponse de M. Becquerel à M. Biot (suivi d'une remarque de M. Biot)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 172-174.	
	Même séance	**Biot, J. B.,** après avoir entendu les réflexions de M. Becquerel fait remarquer qu'elles ne lui semblent pas du tout répondre aux objections qu'il a faites	
	Lundi 4 novembre 1839	**Becquerel, E.** (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 561-567.	

	Lundi 11 novembre 1839	**Biot, J.-B.** (1839). "Note de M. Biot sur le compte rendu de la dernière séance." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 579-581.	
	Lundi 25 novembre 1839	**Becquerel, E.** (1839). "Sur les effets électriques qui se produisent sous l'influence solaire- Lettre de M. Edmond Becquerel " Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 711-713.	
	Même séance	**Biot J. B.** dit « **qu'il regrette de ne pas pouvoir partager les idées théoriques** qu'elle (cette lettre) renferme.	
	Lundi 2 décembre 1839	**Biot, J.-B.** (1839). "Remarques sur quelques points de la théorie des radiations, en réponse à une lettre de M. E. Becquerel, lue à la dernière séance, et insérée au Compte rendu." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 719-726.	
	Lundi 16 mars 1840	**Becquerel, E.** (1840). "Note sur un papier impressionnable à la lumière, destiné à reproduire les dessins et les gravures." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **10**: 469-471.	

1840	Lundi 2 novembre 1840	**Becquerel, E.** (1840). "Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière solaire et la lumière électrique (extrait par l'auteur)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **11**: 702-703.	*Becquerel, E. (1840). Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire;* thèse de physique présentée et soutenue à la faculté des sciences de Paris en août 1840. *Paris, typographie Firmin Didot frères.*
	Lundi 23 novembre 1840	**Becquerel, E.** and A. Cahours (1840). "Recherche sur les pouvoirs réfringents des liquides." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **11**: 867-872.	
1841	Lundi 11 janvier 1841	**Biot, J.-B**., **F. Arago**, et al. (1841). "Rapport sur un mémoire de M. Edmond Becquerel, intitulé: Recherches sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire, et la lumière électrique." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 101-112.	***Becquerel, E.*** *(1841). "Sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière et sur les effets électriques qui en résultent." Bibliothèque universelle de Genève: 136-159.*
	Lundi 18 janvier 1841	**Biot, J.-B.** (1841). "Persistance de l'excitabilité spéciale, dans les papiers imprégnés de bromure d'argent qui ont été impressionnés instantanément." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 170-171.	

	Lundi 1ier février 1841	Talbot, H. F. (1841). "Nouveaux détails sur les papiers impressionnables communiqués à **M. Biot** par M. Talbot." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 225-227.	
	Lundi 26 juillet 1841	**Becquerel, E.** (1841). "Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière, et sur les effets électriques qui en résultent (extrait par l'auteur)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **13**: 198-202.	
1842	Lundi 13 juin 1842	**Becquerel, E.** (1842). "Mémoire sur la constitution du spectre solaire." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **14**: 901-905.	***Becquerel, E.*** *(1842). "Mémoire sur la constitution du spectre solaire." Mémoire des savants étrangers, bibliothèque universelle de Genève **40**(2): 341-367.* ***Becquerel, E.*** *(1842). Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière solaire et la lumière électrique. Paris, Imprimerie royale.*
1843			***Becquerel, E.*** *(1843). "Des effets produits sur les corps par les rayons solaires." Annales de chimie et de physique **9**(3ième série): 257-322.*
1844	*Lundi 4 mars 1844*	***Becquerel, E.*** *(1844). "Des lois qui président à la décomposition électrochimique des corps." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **18**: 362-364.*	

Nous allons maintenant réaliser l'analyse détaillée du processus d'élaboration des appareils, permettant à Edmond Becquerel l'analyse de la lumière solaire. Nous étudierons, pour chaque appareil, et chaque modification de ceux-ci, les expériences qu'il réalise.

1. Le premier appareil à deux phases.

1.1. Objectif et description de l'appareil

La première communication d'Edmond Becquerel concernant l'analyse de la lumière par l'intermédiaire des substances photosensibles a lieu le mardi 30 juillet 1839[47], lorsque son père lit un extrait de son mémoire intitulé « *recherche sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire au moyen des courants électriques* ». Cet extrait sera publié dans les comptes rendus des séances de l'Académie des sciences. Le travail expérimental qu'il y décrit en détail, sera présenté de manière plus concise dans le deuxième chapitre de sa thèse qui sera soutenue un an plus tard. Il introduit ce mémoire en exposant de manière très précise les préoccupations qui l'ont conduit à réaliser ses premières expériences.

L'objectif de ce travail est « *d'étudier la réaction de diverses substances sous l'influence des radiations particulières émanées d'un faisceau lumineux qui réagit sur les éléments des corps pour opérer leur combinaison ou leur séparation*[48] ». Il identifie ces radiations sous le nom de radiation chimique, en précisant d'une part qu'elles sont présentes dans toutes les parties du spectre, d'autre part qu'elles obéissent aux lois physiques de réflexion, réfraction et même polarisation, au même titre que les rayons lumineux dont ces radiations « font partie[49] ».

Il signale que les méthodes employées jusqu'à présent pour identifier ces modifications utilisent l'observation et l'étude du changement de couleur des substances photosensibles. Cette dernière méthode limite énormément le nombre des réactions que

[47] Becquerel, E. (1839). "Recherche sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 145-149.

[48] Ibid.

[49] Ibid. p 145

l'on peut étudier puisque « *dans beaucoup de cas cette combinaison s'effectuant dans un temps très long et sans changement de couleur, on ne peut reconnaître l'influence des rayons chimiques d'après les produits formés* ». Il propose donc, pour effectuer cette étude d'utiliser les « *courants électriques dans la combinaison et la séparation de deux éléments sous l'influence des rayons chimiques* ». A cette fin, il propose la description d'un premier appareil.

Il donne de son appareil la description suivante :

Deux liquides d'inégales densités, conducteurs de l'électricité, étant superposés l'un sur l'autre dans un vase, si l'un des liquides renferme une substance capable de réagir sur une autre qui se trouve dans le second liquide, sous l'influence de la lumière, dès l'instant où l'on fera pénétrer dans la masse la radiation chimique, ils réagiront l'un sur l'autre à la surface de séparation, en produisant un courant électrique qui sera accusé par un galvanomètre, dont les deux extrémités sont terminées par deux lames de platine plongeant dans chaque liquide. [50]

Edmond Becquerel ne donne pas de schéma de son appareil. Nous proposons d'en faire la représentation suivante :

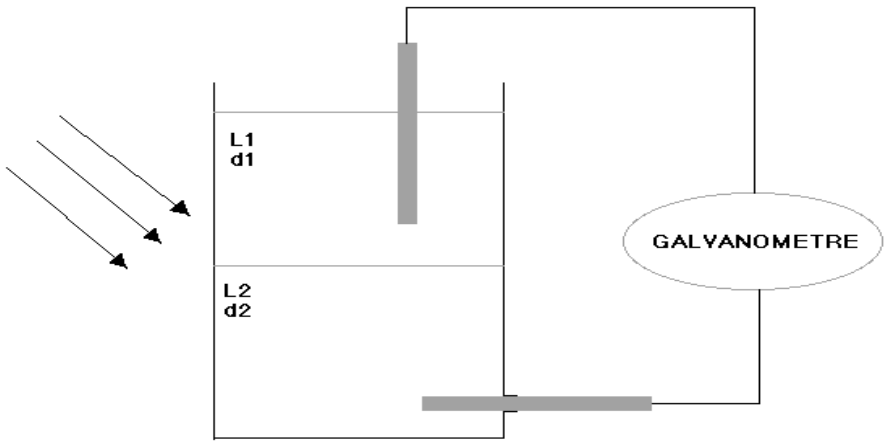


Fig1 : Premier appareil à deux phases liquides (1839)[51]

[50] Ibid. p 146

[51] Edmond Becquerel ne nomme pas cet appareil, et n'en propose pas de représentation. Nous avons réalisée celle-ci afin d'en préciser la structure.

Il s’agit donc ici de faire réagir deux substances dont on sait qu’elles interagissent sous l’effet de la lumière, de manière à pouvoir mesurer les effets électriques que cette réaction produit. Il utilise pour cela les travaux de son père, César Becquerel, qui a montré que la réaction chimique est un moyen de produire du courant.

Ce procédé a l'avantage considérable de permettre de localiser la réaction à la surface de séparation des deux liquides et donc d'évaluer visuellement celle-ci. Dans la mesure du possible, il essaye de faire en sorte qu'un des liquides au moins soit aussi l’un des réactifs. Ceci lui permet de limiter le nombre de réactions parasites et ainsi de mieux contrôler les réactions qu'il souhaite analyser.

1.2. Expériences réalisées et résultats

A l'aide de cet appareil Edmond Becquerel étudie des réactions photochimiques impossibles à étudier dans les conditions classiques qu'il a décrites. La réaction du perchlorure de fer sur l'alcool sous l'effet de la lumière provoque une décoloration très lente du mélange, qui dure plusieurs jours. Afin d'étudier cette réaction en détail il propose d'utiliser l'appareil que l'on vient de décrire. Les deux liquides d'inégales densités sont donc dans son expérience une dissolution concentrée de perchlorure de fer dans l'eau d'une part et de l'alcool d'autre part. Il superpose ces deux liquides dans son vase.

La superposition des liquides est une opération complexe. Il verse d'abord le liquide le moins dense jusqu'à ce qu’il remplisse la moitié du vase, puis à l'aide d'un entonnoir dont il place l'extrémité très effilée en contact avec le fond du vase il verse très lentement le liquide le plus dense, jusqu'à ce que cette couche atteigne la moitié du vase.

Dans chaque liquide plonge une lame de platine, chacune étant reliée à une borne d'un galvanomètre à fil long, très sensible, placé loin du vase. Le vase, opaque, est recouvert d'un écran afin que la lumière ne puisse pas pénétrer à l'intérieur. Il observe dans un premier temps un courant, qui diminue peu à peu, jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre se stabilise. Lorsque l'équilibre est établi, il peut commencer ses expérimentations. Les mesures de déviation de l'aiguille aimantée du galvanomètre sont relevées lors de la première impulsion. Ces déviations ne dépassant jamais 20°, il les considère comme directement proportionnelles aux intensités. Ce type de

considérations est apparemment admis à l'époque. Les tableaux qu'il produit contiennent donc des données en degrés qu'il considère comme représentant des intensités.

La première étape de l'expérimentation consiste à vérifier qu'aucun effet électrique ne se produit lorsque le vase ne contient qu'un seul des deux liquides, afin de s'assurer que la lumière n'a pas d'effet sur chacun de ces liquides pris isolément. Il suffit pour cela de remplir le vase successivement d'un seul des deux liquides et d'effectuer des mesures à l'aide du galvanomètre en les exposant à la lumière. Il n'observe aucun effet et réalise alors la première série d'expériences.

Les séries d'expériences mises en œuvre visent à évaluer les modifications sur les courants mesurés que peuvent apporter des modifications de la source de lumière. Pour cela il effectue une première série de mesures, en comparant les effets de la lumière du jour seule, en ouvrant simplement le vase et en laissant pénétrer cette lumière à l'intérieur. Puis, il expose ce vase à la lumière solaire directe, puis à une lumière plus intense, en orientant un faisceau de celle-ci à l'aide d'un miroir pour qu'elle y pénètre. Les résultats qu'il produit de cette série d'expériences sont les suivants[52] :

Perchlorure de fer. Alcool	Ecrans	Déviation de l'aiguille aimantée, L'appareil étant :		Intensité du courant
		A l'obscurité	A la lumière	
1ière expérience	Sans écran	6°	9°,5	3°,5
Le ciel était serein et la lumière du jour pénétrait dans l'appareil	Verre blanc	6°	9°,5	
		6°	7°,5	1°,5
		6°	8°	
2ième expérience	Sans écran	2°	6°,5	
Ciel serein		2°	6°,5	4°,5
	Verre blanc	2°	5°	
		2°	5°	3°
3ième expérience	Sans écran	0°	10°	
L'appareil étant		0°	10°	10°
exposés au rayons	Verre blanc	0°	6°	
solaires		0°	6°	6°

Tableau 1 : Reproduction du tableau publié par Edmond Becquerel dans sa thèse

[52] Becquerel, E. (1840). Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire; thèse de physique présentée et soutenue à la faculté des sciences de Paris en août 1840. Paris, typographie Firmin Didot frères. p 39

Les troisième et quatrième colonnes contiennent les mesures de déviation de l'aiguille du galvanomètre pour chaque expérience. La dernière colonne contient les valeurs de l'effet produit par la lumière sur l'interface. Elle représente les valeurs mesurées sous l'effet de la lumière, soustraite des valeurs mesurées dans l'obscurité. Il considère donc que celles contenues dans cette dernière colonne correspondent aux seuls effets produits par la lumière.

De cette expérience il conclut que l'effet est d'autant plus grand que la lumière reçue par l'interface entre les deux liquides est intense. L'intensité du courant produit dépend donc selon lui du nombre de rayons reçus par cette interface. Il en conclut que les filtres, qu'il nomme écrans, semblent atténuer l'effet produit par la lumière, et donc diminuer « le nombre de rayons chimiques actifs ».

Se basant sur ces résultats il mène ensuite une nouvelle série d'expériences en analysant les effets de divers filtres, de matériaux, de couleurs et d'épaisseurs différentes sur la réaction. Nous ne présenterons ici qu'un seul des tableaux de données qu'il produit concernant ces expériences, afin de mettre en évidence le traitement qu'il applique à ces mesures. C'est en effet ce traitement qui éveille la première réaction de Jean-Baptiste Biot.

Les conclusions qu'il tire de cette seconde série d'expériences sont les suivantes :

-l'épaisseur de l'écran[53] n'intervient pas dans l'atténuation des effets mesurés. Cette atténuation est différente pour chaque matériau mais reste la même pour un matériau donné quelle que soit son épaisseur.

-l'ordre d'atténuation des filtres, de celui qui atténue le moins l'effet vers celui qui l'atténue le plus, est le suivant : violet, bleu, vert, jaune, rouge.

[53] Nous parlons aujourd'hui de « filtre ».

Il publie le tableau suivant :

Ecrans	Rayons colorés qui traversent les verres[54]	Nombre de rayons chimiques qui traversent les écrans, en représentant par 100 le nombre des rayons incidents[55]
Verre blanc	Blancs	60,5
Verre violet	Rouges, violets	41,4
Verre bleu	Rouges, verts, bleus[56]	25,8
Verre vert	Verts	Insensible[57]
Verre jaune	Rouges, orangés, jaunes, verts	0
Verre rouge	Rouge	0

Tableau 2 : Reproduction du tableau publié par Edmond Becquerel

On peut se demander à quoi sert de connaître l'ordre des écrans dans l'effet d'atténuation de l'action de la lumière sur la réaction. En réalité il s'agit pour Edmond Becquerel de s'assurer que les effets qu'il mesure ne sont pas dus au rayonnement thermique, qu'il nomme rayons calorifiques. Meloni, à l'aide d'une pile thermoélectrique a identifié l'ordre des écrans atténuant le plus les effets thermiques de la lumière plusieurs années auparavant. L'ordre des écrans qu'il a trouvé est le suivant : rouge, jaune, bleu, vert. Cet ordre est selon Becquerel « *complètement différent de l'ordre des écrans qui transmettent l'action chimique de la lumière* ». Il s'assure ainsi que les effets qu'il mesure ne sont absolument pas dus à un échauffement, mais bien à la cause qu'il cherche à analyser.

Edmond Becquerel conclut son article en déclarant que grâce à son appareil et à ses principes de fonctionnement « *on n'aura plus besoin de comparer les teintes diverses du chlorure d'argent pour juger de l'effet des moyens chimiques, puisque cet effet sera mesuré par l'intensité du courant électrique produit dans l'action de la lumière sur les parties constituantes des corps* ». C'est cette observation, associée à la manière dont sont traitées les mesures dans le tableau précédent, qui provoquent la

[54] Il réalise probablement cette analyse en décomposant la lumière transmise par le filtre à l'aide d'un prisme, mais l'explicite pas.

[55] C'est ici qu'apparaît pour la première fois l'idée de la proportionnalité, sans que cela soit explicité dans le texte.

[56] Nous n'avons pas d'explication concernant la présence de lumière rouge dans le spectre de ce filtre.

[57] Aucune précision n'est donnée sur la différence entre « insensible » et « 0 ». Nous pouvons penser que pour le verre jaune, l'aiguille réagit, mais que son mouvement est trop faible pour être mesuré.

première réaction de Jean-Baptiste Biot. La dernière colonne du tableau de résultats présentée est un rapport entre les effets mesurés sans écran et les effets mesurés avec écran. La production de ce rapport représente selon Becquerel le nombre de rayons chimiques qui traversent les écrans, que l'on peut aussi interpréter comme l'effet d'atténuation de chacun de ceux-ci. Ceci sera détaillé de manière précise dans la partie concernant l'analyse de la controverse entre Biot et Becquerel. Nous dirons simplement ici que nous y voyons un désaccord fondamental concernant la nature même de la lumière. Jean-Baptiste Biot reproche à Edmond Becquerel de traiter ces mesures en considérant qu'elles sont proportionnelles au nombre de rayons qui agissent sur les substances, ce qu'il refuse d'admettre. Refusant cette proportionnalité il considère l'appareil de Becquerel comme « un indicateur » de la présence de rayons chimiques mais en aucun cas comme « un mesureur » de celle-ci.

Au-delà de ces remarques, que nous analysons plus loin, Jean-Baptiste Biot soulève l'idée que des effets de la lumière sur la matière peuvent se produire non seulement sur l'interface entre les deux liquides, mais aussi sur les deux plaques de platine elles-mêmes. Ces effets s'additionnant aux effets produits à l'interface, rendent impossible l'exploitation de ceux-ci. Pour répondre à cette objection Edmond Becquerel propose un nouvel appareil.

2. Vers un second appareil

2.1. La recherche de « l'absence d'effets »

On sait à l'époque, grâce aux travaux de César Becquerel, que des lames de platine parfaitement propres, si elles sont à des températures différentes lorsqu'elles sont plongées dans un liquide et reliées entre elles par un galvanomètre, produisent un courant dû à un déséquilibre de température, Edmond Becquerel cite lui-même ces résultats[58]. Dans l'appareil décrit précédemment, la plaque supérieure recevant plus de lumière que la plaque inférieure, il faut pour Becquerel vérifier qu'une partie des effets mesurés ne sont pas dus à un déséquilibre de température lié à l'échauffement plus important d'une plaque par rapport à l'autre. Il lui faut de plus, pour répondre à une des

[58] Becquerel, E. (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 561-567. p 562

objections de Jean-Baptiste Biot, vérifier qu'il n'y a pas d'effet de la lumière sur le métal nu. Ces deux effets risquant de s'additionner à ceux qu'il cherche à analyser pourraient en effet modifier considérablement la valeur de ses résultats.

Edmond Becquerel a déjà montré que les effets thermiques du rayonnement solaire n'intervenaient pas dans la réaction photochimique, en utilisant des écrans et en recherchant l'ordre de ceux-ci, il lui faut maintenant réaliser la même opération, pour vérifier qu'il n'y a pas d'effet sur les plaques de platine elles-mêmes.

L'appareil qu'il a proposé précédemment n'est pas opérationnel pour effectuer ce genre de recherche. Il est donc conduit, pour répondre à ces questions, à imaginer un nouvel appareil. Le seul moyen disponible pour étudier la présence ou non de ces effets est un système au fonctionnement de type différentiel, que César a déjà utilisé plusieurs années auparavant en inventant le galvanomètre différentiel. Ce procédé est le seul dont il dispose pour contrôler l'absence d'un effet. Il permet de construire un système symétrique dans l'obscurité, donc électrochimiquement stable, afin de vérifier si la lumière perturbe cet équilibre. En positionnant deux plaques de métal identiques, reliées entre elles par un galvanomètre, et en exposant une seule de celles-ci à la lumière, il pourra vérifier s'il y a ou non un effet de celle-ci. Si cet effet existe, une seule des deux plaques étant éclairée, un déséquilibre apparaîtra, qui sera accusé par le galvanomètre. Si cet effet n'existe pas, l'aiguille du galvanomètre restera immobile lors de l'éclairement d'une des deux plaques.

Afin de mettre en œuvre ce procédé, il propose l'utilisation d'un nouvel appareil dont il donne la description suivante dans son mémoire intitulé « *sur les effets électriques produit sous l'influence des rayons solaires* », que son père lit à l'Académie des sciences le lundi 4 novembre 1839, et qui sera publié dans les comptes rendus de cette séance :

« *on prend une boîte en bois noircie intérieurement et divisée, au moyen d'une membrane très mince, en deux compartiments, que l'on remplit de la solution d'essai. Dans chacun de ces compartiments, on plonge une lame de platine après l'avoir chauffée préalablement au rouge ; les lames de platine sont mises en communication avec un excellent multiplicateur à fil long, et l'on recouvre enfin chaque compartiment*

avec une planchette, afin d'intercepter l'action de la lumière solaire. Quand on veut opérer on enlève successivement chacune d'elles[59]*».*

À l'aide de cet appareil, dans une première série d'expériences, il mesure effectivement des effets de la lumière sur le métal nu, pour certaines zones du spectre. Il recherche alors l'ordre des écrans permettant l'atténuation de ces effets. Mais il n'obtient absolument pas le même ordre d'écran que Melloni. Il en conclut que ces effets, s'ils existent, ne sont absolument pas dus à l'échauffement des plaques sous l'effet de la lumière.

Pour vérifier de quelle nature sont les effets qu'il mesure, il recherche alors, en envoyant successivement sur la plaque destinée recevoir la lumière les différentes couleurs du spectre solaire, séparées à l'aide d'un prisme, suivi d'une planche percée d'un trou permettant de sélectionner une seule de ces couleurs, quelle lumière agit le plus sur les plaques, et donc produit le plus grand effet. Il n'observe une « action marquée » que pour la lumière violette.

Mais reproduisant ses expériences avec des lames de platine nettoyées à l'acide nitrique, puis chauffées au rouge il ne mesure plus aucun effet. Il en conclut que « *toutes les fois que les lames sont très propres, qu'elles ont séjourné dans l'acide nitrique concentré, puis qu'elles ont été rougies, les rayons du spectre sont absolument sans effet pour déterminer la production de courant électrique dont nous recherchons la cause*[60] ». Les seuls rayons qui ont une action, selon lui, sur les lames de platine sont « *plus réfrangibles que les rayons calorifiques* ». L'effet n'est donc pas dû à un échauffement, et il n'y a une action que si les plaques ne sont pas parfaitement décapées. Il en déduit que ses effets peuvent être « *dûs à l'action des rayons chimiques sur des corpuscules d'une ténuité extrême, qui adhèrent aux surfaces*[61] ». L'effet mesuré est donc dû à une couche d'impuretés à la surface du métal, qui disparaît lors du décapage, expliquant la disparition des effets.

Ce résultat valide, selon lui, le fonctionnement du premier appareil. Aucun effet dû à la lumière sur le métal ne perturbait les résultats publiés, puisque les plaques étaient parfaitement décapées avant usage.

[59] Ibid. p 562

[60] Ibid. p 563

[61] Ibid.

Il faut noter que le principe de fonctionnement dans cette expérience est très proche, dans sa conception, de l'actinomètre électrochimique que nous décrivons plus loin. Il met en œuvre un procédé différentiel utilisant deux plaques identiques, dont l'une est exposée à la lumière et l'autre restant dans l'obscurité.

2.2.La recherche des causes des effets mesurés : vers la photographie

Afin d'étudier l'effet qu'il vient de découvrir, provoqué par une couche d'impuretés à la surface du métal, il choisit d'utiliser son appareil à compartiments avec des plaques de métaux oxydables. Il réalise une première série d'expérimentations avec des lames de laiton. Il place dans un premier temps les lames dans l'appareil après les avoir décapées. Il déclare mesurer un courant de quatre à cinq degrés. Il décide alors de recouvrir une des deux plaques d'une couche importante d'oxyde, afin d'en étudier les effets dans son appareil.

Pour oxyder l'une des deux plaques, il les plonge toutes deux dans un vase. Elles servent alors d'électrodes à une pile de 30 éléments. La lame placée au pôle positif de la pile se couvre d'une couche d'oxyde de cuivre, l'autre reste brillante. En exposant la plaque oxydée aux rayons lumineux dans son appareil à compartiments il observe un courant très important provoqué par celle-ci. Il expose alors cette lame aux différents « *rayons colorés du spectre solaire* » et obtient les résultats suivants :

Rayons du spectre	Intensité du courant par première impulsion
Rouges	1°
Orangés	1°
Jaunes	2°
Verts	4°
Bleus	2°
Indigo	2°
Violets	0°

Tableau 3 : Reproduction du tableau publié par Edmond Becquerel, concernant les expériences réalisées avec l'appareil à deux compartiments.

Il n'analyse pas en détail les résultats de cette expérience, mais constate simplement qu'un effet se produit lorsque la plaque est couverte d'une couche d'oxyde, et que l'effet est maximum, pour la plaque de laiton oxydée, dans les rayons verts.

Edmond Becquerel a obtenu des résultats mesurables en utilisant dans son appareil des plaques de métal dont l'une est recouverte d'une couche de substances qui réagit à la lumière. Sa connaissance des procédés du daguerréotype lui permet probablement de faire le lien entre ces résultats et les plaques d'argent recouvertes d'une fine couche de substances photosensibles qu'il utilise dans cette activité.

Il imagine alors d'utiliser, dans son appareil, des plaques d'argent couvertes d'une couche d'halogénure d'argent. Il est difficile dans cette série de manipulations de savoir si les deux plaques sont couvertes, ou s'il ne recouvre d'halogénure qu'une seule des deux plaques.

Dans le mémoire qu'il publie, cette information n'est pas précisée et à un seul moment dans son rapport de thèse il dit « *en déposant sur une de ces lames une mince couche d'iode* ». Nous supposons donc qu'une seule des deux plaques est recouverte. Si l'on considère qu'une seule des deux plaques est recouverte, lorsqu'il attend l'équilibre, puisque ces deux plaques sont de compositions différentes, il attend probablement la stabilisation de l'aiguille du galvanomètre, mais pas l'annulation du courant, puisque l'équilibre ne peut se réaliser que lorsque les plaques ont atteint le même état.

Il compare dans trois séries identiques d'expériences, l'action de la lumière sur une plaque d'argent couverte d'iodure, de bromure, puis de chlorure d'argent. La préparation de la couche d'iodure et de bromure se fait en exposant les plaques aux vapeurs d'iode et de brome, selon le procédé employé pour la préparation des plaques de daguerréotype. Celle de la couche de chlorure est réalisée en couvrant la plaque d'une couche de chlorure d'argent dissous, puis en la laissant sécher.

Il observe que les effets électriques produits par le bromure sont beaucoup plus importants que ceux produits par l'iodure et le chlorure d'argent. Mais les effets produits par le chlorure d'argent « *donnent pendant très longtemps un courant d'une égale intensité, et même au bout de deux heures d'exposition à la lumière solaire on a encore un courant sensible*[62] ». Le bromure d'argent qui produit des effets beaucoup plus importants, perd très rapidement «*sa faculté de donner du courant* ».

[62] Ibid. p 566

Il ne tire dans son mémoire aucune conclusion concernant ces effets, mais il déclare que « *cette propriété du chlorure d'argent de donner un courant assez constant pendant un certain temps, permet de s'en servir pour déterminer les rapports des nombres de rayons chimiques qui traversent les écrans, ainsi que la distribution des rayons qui influent sur le chlorure d'argent dans le spectre solaire* ». Il publie en conclusion de son mémoire les deux faits suivants :

« 1. Des rayons qui accompagnent les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire font éprouver à des lames métalliques plongées dans un liquide, une action telle, qu'il en résulte des effets électriques auxquels on ne peut attribuer une origine calorifique.

2. La décomposition du chlorure, du bromure, et de l'iodure d'argent sous l'influence de la lumière, produit des effets électriques qui peuvent servir à déterminer le nombre de rayons chimiques actifs. »

Il nous faut ici faire plusieurs observations. D'une part l'utilisation de lames d'argent recouvertes d'une fine couche d'halogénure d'argent, ainsi que le procédé employé pour recouvrir ces plaques nous amène à penser qu'Edmond Becquerel a dans cette étape de ces expériences réussi à construire un lien entre son travail de recherche et sa pratique du daguerréotype. Cette hypothèse est appuyée par le fait que dans la description de ces expériences, dans le mémoire publié, il envisage que les résultats de ces travaux joueront un rôle « *dans l'explication des phénomènes relatifs à la production des dessins photogéniques faits par M. Daguerre* ».

D'autre part, on peut observer dans les conclusions produites par Becquerel à la fin de ce mémoire, un changement conceptuel important. Jusqu'ici, l'objectif de son travail était «*d'étudier la réaction de diverses substances sous l'influence des radiations particulières émanées d'un faisceau lumineux qui réagit sur les éléments des corps pour opérer leur combinaison ou leur séparation* ». L'objet d'étude était donc la réaction des substances sous l'effet de la lumière. Les conclusions de ce mémoire montrent que dorénavant l'objet d'étude de ses recherches sera la lumière, étudiée à l'aide des effets qu'elle produit sur certaines substances photosensibles, en particulier les halogénures d'argent.

3. La thèse d'Edmond Becquerel[63]

Il nous faut à ce moment de l'analyse des publications d'Edmond Becquerel faire un détour pour présenter rapidement sa thèse. Ce texte, qu'il soutient en été 1840, contient la description précise de toutes les expériences, et des deux appareils, que nous venons de décrire. Cependant, l'ordre dans lequel il choisit de présenter ceux-ci est considérablement différent de celui qui apparaît dans l'analyse de ses communications.

La thèse d'Edmond Becquerel fait 49 pages. Le premier chapitre, consacré à un historique des découvertes concernant les substances photosensibles et les réactions photochimiques, s'étend sur 21 pages. Le second chapitre se découpe en deux parties. La première partie décrit les expériences réalisées à l'aide de l'appareil à deux compartiments. Elle a pour but de montrer dans un premier temps que les effets étudiés ne sont pas d'origine thermique puis dans un second temps de montrer que l'on peut étudier les réactions photosensibles par l'intermédiaire des courants électriques. La deuxième partie de ce chapitre décrit alors l'étude des réactions photochimiques à l'aide de l'appareil à deux phases. Les conclusions qu'il tire à la fin de ce travail sont les suivantes :

1. Dans un faisceau de rayons solaires, certains rayons, différents des rayons lumineux et calorifiques réagissent sur des lames métalliques plongées dans un liquide conducteur, de manière à donner naissance à un courant électrique dont l'intensité peut être mesurée à l'aide d'un galvanomètre.

2. Les bromures, chlorures et iodures d'argent, substances très impressionnables à la lumière solaire, lors de leur exposition à ce rayonnement, donnent naissance à un courant électrique dont l'intensité sert à comparer les effets chimiques produits.[64]

Ce texte reconstruit complètement, a posteriori, la démarche employée par Edmond Becquerel dans ses recherches, et le cheminement qui l'a conduit aux résultats qu'il présente. Alors que la construction du second appareil à deux compartiments a été rendue nécessaire par les objections de Jean-Baptiste Biot à la suite des travaux réalisés

[63] Becquerel, E. (1840). Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire; thèse de physique présentée et soutenue à la faculté des sciences de Paris en août 1840. Paris, typographie Firmin Didot frères.

[64] Ibid. p 49

avec l'appareil à deux phases, il est présenté ici comme le premier appareil qu'il construit afin d'explorer la question *« des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de lumière solaire* ». Il n'est d'ailleurs pas fait mention des remarques de Jean-Baptiste Biot concernant ce travail. La construction du texte montre une démarche structurée dans laquelle on cherche tout d'abord à cerner précisément les causes qui produisent les effets étudiés. Une fois ces causes bien délimitées on cherche à les analyser. La démarche réelle d'Edmond Becquerel, telle qu'elle apparaît dans les comptes rendus de l'Académie des sciences, est totalement inverse.

D'autre part les conclusions qu'il tire dans sa thèse, partant des mêmes expériences et des mêmes instruments, sont complètement différentes des conclusions qu'il tire dans ses mémoires. Alors qu'il considère les résultats apportés par le deuxième appareil à deux compartiments comme permettant d'envisager l'analyse de la lumière par l'intermédiaire des substances photosensibles dans la conclusion de son mémoire, la conclusion de sa thèse présente les mêmes résultats comme permettant d'étudier les effets chimiques produits, c'est-à-dire permettant de poursuivre l'analyse des substances et des réactions de celles-ci sous l'effet de la lumière.

4. La découverte de nouveaux rayons

Les recherches que mène Edmond Becquerel à la suite de sa thèse semblent être celles qui sont consignées dans son mémoire intitulé « mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière solaire et la lumière électrique[65] ». Bien que ce mémoire paraisse en 1842, c'est-à-dire après le premier mémoire décrivant l'actinomètre électrochimique, le rapport qu'en font Arago, Savary et Biot dans les comptes rendus d'Académie des sciences, paraît le 11 janvier 1841. De plus les informations qu'il contient, et que nous allons décrire ici, sont utilisées dans le mémoire suivant, décrivant l'actinomètre électrochimique. Il semble donc que ces recherches précèdent la naissance de ce dernier.

Le travail consigné dans ce mémoire vise à étudier l'action chimique du spectre solaire. Becquerel y décrit la découverte « *de deux ordres de rayons chimiques*[66] », les

[65] Becquerel, E. (1842). Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière solaire et la lumière électrique. Paris, Imprimerie royale.

[66] Ibid. p 3

rayons excitateurs et les rayons continuateurs. Pour réaliser ses recherches il n'utilise pas seulement cette fois des plaques de métal couvertes d'une substance photosensible, technique que nous rapprochons du daguerréotype, mais aussi des papiers enduits de substances, selon une technique très proche de celle du calotype développé par Talbot. Cette technique photographique, concurrente de celle de Daguerre, apparaît sensiblement à la même époque.

Le but de ce mémoire est de prouver que « *des rayons qui ne peuvent pas impressionner sensiblement une substance préparée à l'abri de toute radiation, peuvent continuer très vivement l'action que des rayons différents auraient commencés à exercer sur elle* ».

Pour réaliser ces expériences Edmond Becquerel prépare une feuille de papier sensible, en employant le « *procédé indiqué par M. Talbot* ». Il imprègne une feuille de papier d'abord d'une solution de bromure de potassium, puis après qu'elle a séché, il la recouvre d'une couche de nitrate d'argent. Cette opération se réalise dans l'obscurité complète. À la surface du papier se forme donc du bromure d'argent. Cette feuille est partagée en deux bandes identiques. La première sera conservée dans l'obscurité tandis que sur la seconde sera projeté un spectre solaire complet, comprenant « *non seulement l'amplitude visible du spectre, mais encore au-delà de cette amplitude jusqu'à une certaine distance, principalement du côté de l'extrémité rouge* ». Le papier s'impressionne, principalement dans les parties qui correspondent aux rayons visibles s'étendant du bleu au violet et un peu au-delà. L'autre partie du spectre ne se colore pas du tout.

La deuxième bande de papier, conservée jusque-là dans le noir absolu est recouverte d'une bande de carton épais dans lequel on a découpé des bandes transversales. On expose ce papier recouvert du carton moins d'une seconde à la lumière solaire directe. Le papier ne présente alors quasiment pas de traces de l'impression de la lumière. On expose ensuite ce papier découvert au spectre solaire de la même manière que précédemment. On voit alors apparaître, là où le papier n'était pas couvert par le carton lors de la première manipulation, des bandes noires très intenses, alors que là où le papier était couvert par le carton, aucune coloration n'apparaît. Edmond Becquerel note que la coloration est beaucoup plus vive dans les bandes exposées aux rayons verts, jaunes, orangés et rouges.

En comparant les résultats obtenus avec ses deux bandes de papier, Edmond Becquerel conclut que « *certains rayons, inhabile à exercer primitivement une action*

sur le papier, sont très propres à continuer cette action, quand elle a été commencée par d'autres ». C'est-à-dire que la lumière correspondant à l'extrémité rouge du spectre ne peut pas impressionner directement le bromure d'argent, mais que si celui-ci a été préalablement exposé aux rayons de l'extrémité bleue du spectre, les rayons rouges poursuivront avec beaucoup plus d'efficacité que les rayons bleus la modification chimique subie par la substance. Il existe donc selon Becquerel des rayons excitateurs, qui permettent d'y initier la réaction photochimique, et des rayons continuateurs, qui permettent de la poursuivre et de l'achever.

Il réalise ensuite des séries d'expériences équivalentes en utilisant d'abord des filtres pour sélectionner les couleurs de la lumière qu'il étudie, à la place du spectre. Puis il analyse ces effets en utilisant d'autres sources lumineuses, tels que des bougies, et des lampes produisant une « lumière électrique ». Il obtient les mêmes résultats que précédemment.

L'usage de cette découverte se répand très rapidement pour développer les différents procédés photographiques, que ce soit le daguerréotype ou le calotype. La semaine suivant la publication du rapport de Biot concernant ce mémoire dans les comptes rendus de l'Académie des sciences[67] paraît une communication de ce dernier [68] dans laquelle il poursuit la reproduction des expériences de Becquerel, qu'il avait commencée en collaboration avec Savary et Arago dans le but de rédiger le rapport sur ce mémoire. Il y développe une nouvelle série d'expériences. Le 1er février 1841 Biot, de nouveau, communique à l'académie une lettre de Talbot[69] dans laquelle ce dernier revendique avoir découvert ces effets dès 1835, mais Biot lui fait remarquer que les expériences qu'il avait menées à l'époque étaient très complexes, «*d'où il eût été difficile de conclure immédiatement les modifications de l'impressionnabilité que M. E. Becquerel avait ainsi nettement discernées, et si rigoureusement analysés dans son mémoire* ». Le 10 mai 1841 Gaudin[70] annonce que « *la découverte de M. Becquerel concernant l'action*

---

[67] Biot, J.-B., F. Arago, et al. (1841). "Rapport sur un mémoire de M. Edmond Becquerel, intitulé: Recherches sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire, et la lumière électrique." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 101-112.

[68] Biot, J.-B. Ibid."Persistance de l'excitabilité spéciale, dans les papiers imprégnés de bromure d'argent qui ont été impressionnés instantanément." 170-171.

[69] Biot, J.-B. (1841). "Nouveaux détails sur les papiers impressionnables communiqués à M. Biot par M. Talbot." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 225-227.

[70] Gaudin Ibid."Application des propriétés des rayons continuateurs aux opérations de la photographie." 862-863.

photographique des rayons rouges, s'applique parfaitement au procédé de M. Daguerre ». Dans une nouvelle communication, le 7 juin 1841[71], il annonce l'utilisation réussie des rayons excitateurs et continuateurs pour l'amélioration des procédés photographiques, et en particulier pour la diminution considérable des temps de pose des daguerréotypes.

Le travail d'Edmond Becquerel se poursuit donc, dans des recherches concernant la nature de la lumière et l'action chimique de celle-ci. Les procédés photographiques semblent au centre des moyens qu'il utilise pour réaliser ses recherches. Il considère lui-même les résultats qu'il obtient comme très utiles pour l'amélioration de la photographie. Mais ses contemporains eux aussi voient dans les résultats de ces recherches des moyens d'améliorer les procédés, qu'il met en œuvre immédiatement, et qui conduisent très vite à des résultats importants. Il est probable que la facilité avec laquelle ces découvertes peuvent être mises en application dans la photographie découle directement du fait que ces recherches sont menées en utilisant les procédés mêmes de celle-ci.

5. La naissance de l'actinomètre électrochimique.

5.1. Description de l'appareil, mode d'utilisation

C'est le 26 juillet 1841[72] qu'apparaît pour la première fois dans les comptes rendus de l'Académie des sciences la description d'un nouvel appareil inventé par Edmond Becquerel, qu'il nomme actinomètre électrochimique. Il choisit d'utiliser ce terme en référence à celui d'« actinometer » inventé par Herschel, désignant un appareil permettant d'effectuer des mesures de l'activité de la lumière solaire. Ce terme a été francisé par Pouillet pour désigner un appareil destiné à mesurer la température zénithale, puis utilisé par Arago pour désigner un appareil permettant d'effectuer des mesures sur la lumière. Il y ajoute électrochimique afin de mettre en évidence que ces

[71] Gaudin (1841). "Supériorité des rayons jaunes comme rayons continuateurs dans les opérations photographiques." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 1060.

[72] Becquerel, E. Ibid."Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière, et sur les effets électriques qui en résultent (extrait par l'auteur)." **13**: 198-202.

mesures seront effectuées par le biais de courants électriques produits lors de réactions chimiques.

Cet appareil a un principe de construction et un mode de fonctionnement extrêmement proches de l'appareil à deux compartiments que l'on a décrit plus haut. Son utilisation présente cependant quelques différences, puisqu'il est destiné à analyser la lumière solaire, et non plus les réactions chimiques sous l'effet de la lumière.

Il donne dans son mémoire intitulé « sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière, et sur les effets électriques qui en résultent[73] » la description suivante de l'actinomètre électrochimique :

« *Cet appareil se compose d'abord d'une table longitudinale de deux à trois mètres de longueur, munie d'une règle divisée, le long de laquelle peut se mouvoir avec très peu de frottement une planchette de bois carrée, supportant une cuve à eau. Cette cuve est cubique de dix centimètres de côté ; dans son intérieur, remplie d'une solution étendue de sulfate de soude ou de toute autre solution conductrice de l'électricité, plongent deux lames d'argent de 25 centimètres carrés chacune, peu épaisses et attachées à deux montants en cuivre au moyen de fils d'argent. Ce sont ces montants fixés sur la planchette, qui font communiquer les lames avec les deux extrémités du galvanomètre. En avant de la cuve à eau et sur la planchette, sont placés deux écrans : l'un en cuivre est percé d'une ouverture verticale et rectangulaire de 1 cm de largeur et ayant la hauteur de la cuve ; cette ouverture correspond au milieu de celle-ci, de sorte qu'en éclairant l'écran il n'y a que la portion de la lame d'argent immédiatement derrière l'ouverture qui soit éclairée et qui reçoive les effets du rayonnement.*

L'autre écran complètement opaque, peint en blanc, est placé vis-à-vis du précédent et immédiatement devant lui, lorsqu'on veut intercepter toute action du rayonnement et connaître la portion du spectre solaire qui frappe le centre de l'ouverture du premier écran. »

Le schéma qui suit est celui que publie Becquerel dans son mémoire. On peut observer que les choix faits pour la représentation modifient considérablement la disposition, par rapport à celle décrite, nécessaire pour la réalisation de l'expérience. La

[73] Becquerel, E. (1841). "Sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière et sur les effets électriques qui en résultent." Bibliothèque universelle de Genève: 136-159.

cuve est représentée de face afin que de mettre en évidence la fente, elle est en réalité tournée de 90°, afin que la lumière décomposée par le prisme y pénètre. Le spectre est représenté comme se formant verticalement entre a et b. Le mode déplacement de la cuve, de la droite vers la gauche impose en réalité que l'étalement soit horizontal. De même la représentation montre la cuve alignée avec la source de lumière et le prisme, alors que la déviation lors de la décomposition impose que ces instruments ne soient pas alignés.

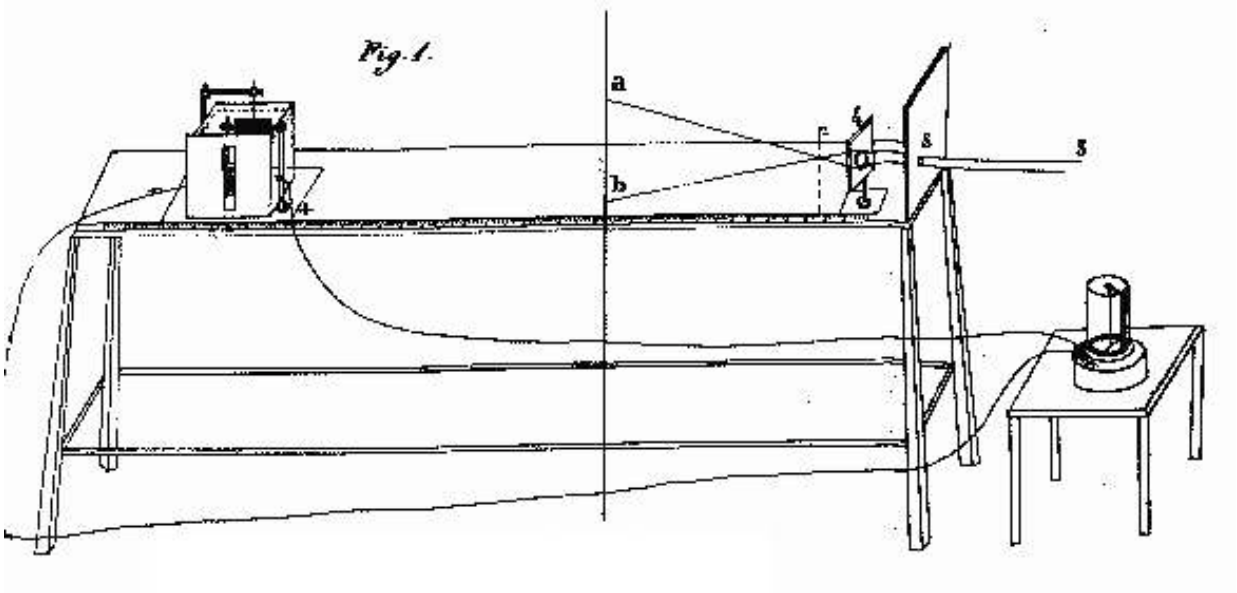


Fig 2 : Schéma de l'actinomètre électrochimique publié dans son mémoire de 1841

La décomposition de la lumière solaire en spectre est réalisée à l'aide d'un prisme placé sur la table qui reçoit un faisceau de lumière issue du volet de la chambre noire dans laquelle il travaille. Le système qui permet de faire coulisser la cuve latéralement, décrit par Becquerel, donne la possibilité de faire rentrer successivement par la fente percée dans le premier écran les différentes couleurs du spectre afin d'en observer les effets sur la matière.

Les deux plaques d'argent qui plongent dans la cuve sont recouvertes d'une couche d'iodure d'argent. Afin de préparer ces plaques il les expose aux vapeurs d'iode en les suspendant simplement au-dessus d'un récipient contenant des cristaux de diiode, après les avoir décapées en les lavant à l'acide nitrique, puis en les chauffant au rouge. Ces deux plaques sont disposées de manière à ce que celle placée face à la fente du premier écran reçoive la lumière sur sa couche iodurée. La seconde, qui se trouve derrière la paroi séparant les deux compartiments, est complètement protégée de la

lumière. Chacune de ces lames est reliée aux bornes d'un galvanomètre, permettant d'effectuer les mesures de courant provoqué par le déséquilibre créé entre les deux plaques lors de l'éclairement d'une de celle-ci.

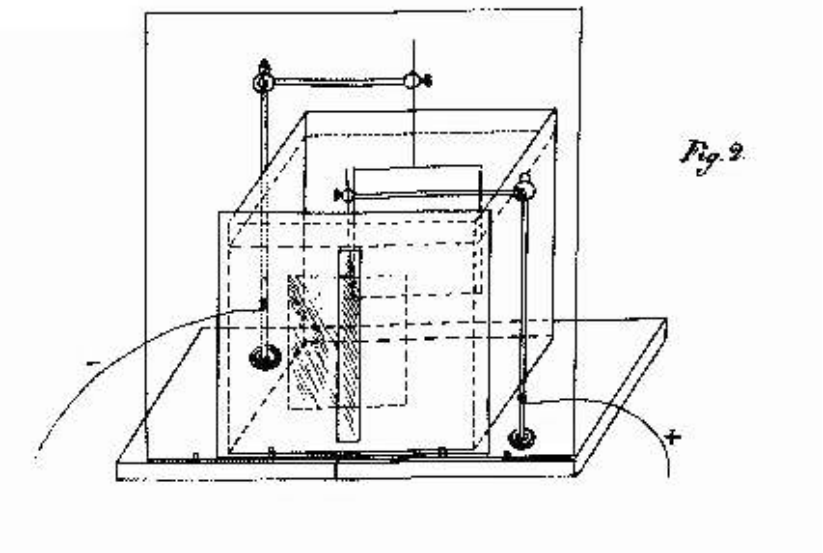


Fig 3 : Schéma de la cuve de l'actinomètre électrochimique publié en 1841

L'une des principales précautions à prendre lors de la préparation des plaques, est de les mettre autant que possible dans le même état d'ioduration. Un bon moyen de faire cela est d'iodurer une seule plaque que l'on coupe ensuite en deux. Quoi qu'il en soit lorsque l'on a installé les plaques dans l'appareil il faut attendre plusieurs heures pour que l'équilibre entre les plaques s'établisse, et que l'aiguille du galvanomètre se fixe.

L'actinomètre électrochimique doit être placé dans une pièce « parfaitement obscure », la seule lumière que l'on puisse utiliser pour travailler est celle d'une bougie qui doit être placée loin de la cuve de l'appareil.

Lorsque l'on effectue des mesures d'effets électriques produits par la lumière sur la plaque éclairée, il faut ouvrir la trappe permettant l'éclairement pendant un temps le plus bref possible. Dans ce cas la même lame peut être « *exposée un grand nombre de fois dans les mêmes conditions d'éclairement, en donnant sensiblement la même déviation* ». On peut alors faire avec la même paire de plaques plusieurs séries d'expériences comparables entre elles.

La forme de l'appareil ainsi que son principe de fonctionnement, basé sur l'utilisation d'un procédé différentiel utilisant deux plaques identiques, l'une recevant la

lumière l'autre restant dans l'obscurité, est très proche de la description qu'il donne de son appareil à deux compartiments. L'exposition successive de la plaque éclairée aux différentes zones du spectre solaire est elle aussi une technique que Becquerel a utilisée dans son appareil précédent. Cependant cet appareil, qui fonctionne avec deux plaques d'argent couvertes d'iodure d'argent, ou de bromure d'argent parfois, n'a pas pour vocation d'étudier la réactivité des substances photosensibles. Celle-ci est fixe, et reste la même tout au long de l'expérimentation. Elle permet l'analyse de différentes lumières par la comparaison des effets qu'elles provoquent sur une substance donnée.

Le principe de construction de l'actinomètre électrochimique est donc très proche de celui de l'appareil à deux compartiments, lors de l'expérience réalisée avec des plaques de platine non-décapées. Les deux plaques sont identiques et couvertes d'une couche de substance sensible à la lumière. Le procédé différentiel employé permet de mettre en évidence un déséquilibre entre les plaques quand l'une est éclairée et l'autre reste dans l'obscurité. Les autres expériences menées avec l'appareil à deux compartiments semblent ne pas présenter le même principe d'équilibre, basé sur l'identité des deux plaques.

5.2.Les expériences menées avec l'actinomètre électrochimique

5.2.1. La vérification des propriétés des rayons excitateurs et continuateurs

La première série d'expériences[74] qu'Edmond Becquerel effectue à l'aide de cet appareil consiste en un balayage systématique de l'ensemble du spectre solaire, créé à l'aide d'un prisme en flint-glass, depuis le rouge jusque au violet et même au-delà. Il effectue ainsi deux allers retours, du rouge vers le violet puis du violet vers le rouge. À chaque passage il réalise 18 mesures régulièrement réparties sur le spectre. Il mesure donc les courants pour 18 zones différentes du spectre solaire.

Il observe lors du premier passage, allant du rouge vers le violet, une absence complète de courant, qu'il interprète comme une absence complète de réaction, pour les rayons rouges. La réaction commence dans le jaune, pour lequel il mesure une déviation de 2°, et augmente pour atteindre son maximum au-delà du violet, pour lequel il mesure une déviation de 20 à 30°. Lors du passage en sens inverse du violet vers le rouge, il

[74] Ibid.

obtient les mêmes déviations pour le violet, mais mesure une action plus forte que précédemment à partir du vert, maximum pour les rayons jaunes puis diminuant jusqu'au rouge foncé. Le courant mesuré sera de plus en plus fort pour les rayons jaunes à chaque passage, après avoir réexposé la plaque aux rayons violets, jusqu'au quatrième passage. L'intensité maximum du courant, atteint alors dans les rayons jaunes une intensité sensiblement identique à celle obtenue dans les rayons violets.

Il vérifie ainsi que de la lumière de l'extrémité rouge du spectre, n'agissant pas directement sur les substances, peut « poursuivre une action commencée » par la lumière de l'extrémité violette du spectre. Il vérifie aussi qu'il y a « *une action au-delà du violet, jusqu'à une distance égale au 0,7 de la longueur du spectre* », alors qu'au-delà du rouge il ne note aucune action.

Pour la première fois dans un de ses mémoires Edmond Becquerel cherche à établir une loi permettant de quantifier les rapports entre le courant produit par les rayons excitateurs et les courants produits par les rayons continuateurs. Il calcule ses rapports et conclut qu'il ne semble pas y avoir de relation qui les lie.

5.2.2. La comparaison des spectres de différentes origines.

Il compare ensuite les résultats donnés par son appareil en fonction du matériau dans lequel sont fabriqués les prismes qui lui servent à disperser la lumière solaire. Il dispose de trois prismes, un en flint-glass, un en sel de gemme, et un en alun. Il recherche en particulier si les positions des maximums d'effet pour les rayons excitateurs et pour les rayons continuateurs changent en fonction de la nature du prisme. Il n'observe que très peu de différence pour ces trois prismes, que ce soit dans la position de ces maximums ou dans l'intensité de ceux-ci. Cependant il n'en conclut pas que le matériau n'influe pas sur la lumière. Il semble clair pour lui que la nature du matériau agit sur la lumière. Mais il reconnaît que dans l'actinomètre la lumière avant de frapper la lame d'argent doit, quelle que soit la nature du prisme, traverser en arrivant sur la cuve une couche de verre et une couche d'eau. L'absorption qui a lieu dans cette étape neutralise probablement les différences d'absorption des différents prismes.

Afin de comparer d'autres sources de lumière, il décide d'étudier de manière comparative la lumière produite par différentes lampes et la lumière solaire. La description de cette expérience est très brève dans son mémoire. Il signale simplement qu'il n'utilise plus pour cela la décomposition par un prisme, mais des filtres qu'il place

devant cette lumière. Il ne cite que les conclusions de ce travail. Il signale que la lampe d'Argand « *contient beaucoup plus de rayons chimiques continuateurs qu'un faisceau de rayons solaires, c'est-à-dire beaucoup plus de rayons le moins réfrangibles* ».

Il envisage ensuite de vérifier l'influence de l'intensité de la lumière sur l'intensité du courant. Là encore la description de l'expérience et de ses résultats est extrêmement concise. Il signale simplement que, afin de faire varier l'intensité de la source lumineuse il forme à l'aide d'une lentille un cône de lumière. Prenant en compte la loi selon laquelle l'intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance au foyer, il considère qu'en doublant la distance au foyer il divisera par quatre l'intensité de la lumière. Il conclut son article en signalant que les résultats qu'il obtient concernant les intensités du courant sont loin d'être en raison inverse du carré de la distance. Il signale donc que dans la suite de son travail il mènera des expériences plus précises, entre des plus grandes limites, « *pour pouvoir construire une courbe des intensités du courant d'après les intensités des rayons chimiques* ».

Les expériences qui suivront seront effectivement plus précises, mais il ne produira plus de résultats cherchant à quantifier l'intensité du courant en fonction de l'intensité de la lumière. Cette piste qu'il semble présenter en 1841 comme un travail d'avenir ne sera plus apparemment explorée par lui.

5.2.3. L'analyse fine du spectre solaire.

Dans le mémoire intitulé « *sur la constitution du spectre solaire*[75] » qu'Edmond Becquerel présente à l'académie le 13 juin 1842, il cherche à répondre à une question de Jean-Baptiste Biot concernant les relations qui peuvent exister entre le spectre chimique et le spectre lumineux. Il recherche donc « *si le spectre chimique est continu, ou bien si, de même que le spectre lumineux, il est interrompu par des raies sombres plus ou moins épaisses* ».

Pour effectuer ses recherches il utilise les différents procédés photographiques connus à l'époque, en particulier le procédé daguerréotype et le procédé calotype. Dans la chambre noire, dans laquelle rentre un pinceau de lumière solaire d'environ 1 cm de large, il place une fente réglable qui l'intercepte. Le rayon, dont la largeur est réduite à

[75] Becquerel, E. (1842). "Mémoire sur la constitution du spectre solaire." Mémoire des savants étrangers, bibliothèque universelle de Genève **40**(2): 341-367.

environ 1 mm, traverse un prisme de flint-glass placée dans la position du minimum de déviation. Juste derrière le prisme est placé une lentille convergente ayant une focale d'environ un mètre. Derrière cette lentille, à environ deux mètres, est placé un écran blanc sur lequel se forme le spectre, mettant en évidence les raies de Fraunhofer de manière très nette.

Il place alors sur l'écran des plaques préparées à la manière de Daguerre, qu'il laisse exposées au spectre solaire pendant une à deux minutes. Il révèle ensuite l'image en les exposant aux vapeurs de mercure. Il reproduit cette opération en utilisant des plaques simplement iodurées, et différents papiers calotypes préparés à la manière de Talbot. En modifiant la durée d'exposition, il parvient à observer des raies dans « *le spectre chimique* ». Les images obtenues sur les plaques et les papiers étant fixées, il peut comparer celles-ci à celles du spectre lumineux. La conclusion qu'il apporte sur ces expérimentations est qu'il a « *été conduit à ce résultat curieux que le spectre chimique a les mêmes raies que le spectre lumineux ». De plus, les plaques utilisées étant sensibles à la zone au-delà du violet, il note qu' « en dehors des parties visibles on trouve une infinité de raies*[76] ».

Pour la première fois, dans ce mémoire, Edmond Becquerel prend position concernant la nature de la lumière. Il se place dans le cadre de la théorie de Fresnel, « dont *les beaux travaux ont contribué à faire triompher cette théorie*[77] » (il parle précédemment de « *la théorie des ondulations* »). Il est conduit à cette prise de position en arrivant à la conclusion que les spectres chimiques et lumineux ont les mêmes raies. Considérant cette propriété comme déterminante il est amené à considérer qu'il n'y a qu'un seul et même spectre, provenant d'une seule et même cause. C'est bien la lumière qui produit les effets chimiques, et pas un spectre chimique qui lui est superposé. Le spectre solaire, dans son unité, « jouit de diverses propriétés », comprenant les propriétés chimiques. L'une des conclusions de ce mémoire est :

« Si l'on considère la rétine comme un organe qui perçoit les vibrations de l'éther, elle n'est impressionnable que par des rayons compris entre certaines limites de

[76] Ibid. p 347

[77] Ibid. p 365

réfrangibilités, et les rayons actifs formant le spectre qui, dans ce cas se trouve être le spectre lumineux.

Ainsi, d'après cette hypothèse, on ramènerait tous les effets produits sous l'influence de la lumière à l'action d'un même rayonnement sur les différents corps ».

Considérant alors que les analyses du spectre chimique qu'il a réalisées peuvent être assimilées à des analyses de la lumière, il emploie dans les mêmes conditions son actinomètre électrochimique.

Il positionne alors la cuve de l'actinomètre, accompagnée de son système coulissant devant l'écran où se forme le spectre. Il dit avoir noté la présence de ces raies noires, par l'absence de courant produit lors de la projection de ce spectre dans la cuve. Il ne donne aucune précision sur les modifications qu'il apporte à son dispositif à cette époque-là. Ce n'est que dans son mémoire de 1851[78] qu'il donnera plus de précisions sur les conditions expérimentales dans lesquelles il réalise ces mesures. Il conserve le montage comprenant la fente variable, le prisme et la lentille convergente, mais rajoute « *en avant de la cuve à eau contenant les lames sensibles, un écran à ouverture variable ; cette ouverture est haute de 4 cm et sa largeur varie depuis zéro jusqu'à 4 cm.* […] *Ce procédé permet de mesurer, au centième de millimètre près, la largeur de l'ouverture variable de l'écran*[79] ».

Afin d'effectuer les mesures de position des raies, la cuve de l'actinomètre est placée sur un petit chariot que l'on peut déplacer avec très peu de frottement le long d'une règle graduée. La cuve se déplaçant le long de cette règle, la plaque éclairée se déplace le long du spectre de la même distance. On peut ainsi connaître la position des raies relativement à la taille du spectre. Le spectre a une longueur d'environ 70 cm.

À l'aide de ce dispositif Edmond Becquerel vérifie la position des raies de Fraunhofer. Les portions du spectre qu'il analyse étant extrêmement fines, il observe que pour certaines d'entre elles il n'y a pas d'effet électrique produit. Il n'y a donc pas de lumière dans ces zones. Ce résultat valide le fonctionnement de son instrument, puisqu'il obtient avec son appareil des résultats identiques à ceux obtenus par d'autres techniques, et en particulier l'observation directe.

---

[78] Becquerel, E. (1851). "Note relative aux effets électrochimiques produits sous l'influence de la lumière solaire." Annales de chimie et de physique **32**(3ième série): 176-194.

[79] Ibid.

Il mesure ensuite des raies dans la zone au-delà du violet. Dès son mémoire intitulé «*des effets produits sur les corps par les rayons solaires*[80] », qu'il présente à l'Académie des sciences le 23 octobre 1843, il considère, citant les travaux de Herschel, qui avait identifié des rayons dans cette zone, que ces rayons sont de la lumière, même s'ils sont invisibles pour l'œil humain. Il déclare qu'« *ils existent, et ce qui le prouve, ce sont les raies que l'on trouve dans cette partie du spectre* ». D'une part l'identité des propriétés l'amène à considérer que ces rayons sont de la lumière, d'autre part, le fait que pour les étudier il a simplement déplacé la cuve afin d'y faire pénétrer la partie du spectre au-delà du violet lui permet de considérer que ce rayonnement est dans la continuité de la lumière visible.

Conclusion

Nous avons souhaité dans cette partie réaliser une description chronologique la plus précise possible des expériences menées par Edmond Becquerel entre 1839 et 1843. Il poursuit ses expériences sur la nature de la lumière bien au-delà. La description qu'il donne de l'actinomètre électrochimique dans son ouvrage intitulé « *la lumière : ses causes, ses effets* », publié en 1868[81], montre que son dispositif a encore beaucoup évolué ensuite. La dernière publication qu'il produit sur ce sujet, qui paraît en 1851, est un mémoire rassemblant une très grande partie des informations contenues dans les mémoires précédents. Il y donne plus de précisions sur les procédés expérimentaux, et en particulier des informations sur les quantités de substances chimiques qu'il utilise dans ces procédés. Il est difficile de connaître l'usage qu'il fait de l'actinomètre électrochimique entre 1851 et 1867. On sait que des étudiants l'utiliseront dans son laboratoire au Muséum. Egoroff[82] associera deux actinomètres électrochimiques afin de construire un procédé double différentiel. Il réalisera ses travaux au Muséum à un moment où Edmond Becquerel occupe la chaire de physique appliquée. Il est probable que cette série de travaux lui ait été proposée par Becquerel lui-même. On peut alors

[80] Becquerel, E. (1843). "Des effets produits sur les corps par les rayons solaires." Annales de chimie et de physique **9**(3ième série): 257-322.

[81] Becquerel, E. (1868). La lumière, ses causes, ses effets. Paris, Firmin Didot Frères, fils et cie.

[82] Egoroff, N. (1876). "Electro-actinomètre différentiel." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **82**: 1435-1438.

supposer qu'Edmond Becquerel a poursuivi l'utilisation de l'actinomètre électrochimique bien au-delà de la date à laquelle il cesse de publier sur le sujet.

Le choix chronologique de présentation de ses travaux nous a permis de mettre en évidence l'évolution des réflexions d'Edmond Becquerel associée à l'évolution des différents appareils qu'il produit. Ceci lui permet d'aboutir à la construction et à l'utilisation de l'actinomètre électrochimique. Cette évolution est guidée selon nous par deux orientations principales que nous avons voulu mettre en évidence. La première est l'obligation qu'il a de répondre aux objections de Jean-Baptiste Biot. La seconde est la possibilité qu'il a d'exploiter une de ses compétences particulières, développée en dehors de son cadre professionnel, la photographie.

Nous avons souhaité montrer l'importance expérimentale qu'elle joue. Nous avons abordé dans cette partie le travail d'Edmond Becquerel sous un angle essentiellement technique en cherchant, dans la mesure où ce n'était pas indispensable, à éviter d'aborder le contenu théorique. Cela nous semble nécessaire pour mettre en évidence l'importance qu'occupent les procédés photographiques dans les travaux de Becquerel. Cette découverte toute récente n'est alors que purement technique. Elle s'est développée grâce à la collaboration d'excellents manipulateurs et inventeurs, et l'association d'artistes. Ce n'est qu'après la publication des procédés par Arago que la communauté scientifique s'y intéresse et cherche à en expliquer les principes. Dans la période étudiée, on peut considérer que le physicien qui participe le plus efficacement à cette recherche est Edmond Becquerel.

Troisième partie :

Troisième partie : La réplication des expériences d'Edmond Becquerel

Troisième partie : La réplication des expériences d'Edmond Becquerel

Nous décrivons dans cette partie le travail que nous avons effectué concernant la réplication des instruments utilisés par Edmond Becquerel, et des expériences qu'il a menées avec ceux-ci. Nous pensons qu'il est possible de considérer le travail que nous avons mené comme une activité de réplication. Malgré les différences qu'il présente avec celui de Becquerel, que nous développerons ici, la démarche que nous avons mise en œuvre, et les résultats que nous en tirons semblent ne pas être mis en péril. Une réflexion concernant cette activité de reproduction d'appareils et d'expériences, développée dans la dernière partie de ce travail, nous permet d'appuyer ces considérations. Nous ne la répéterons pas ici

Nous présenterons ici la réplication de chaque appareil construit par Edmond Becquerel, en décrivant à chaque fois le processus de fabrication, la mise en place de l'expérimentation, sa réalisation et les résultats que nous en avons obtenus. Afin d'éclairer les descriptions des difficultés rencontrées et des informations que l'on peut tirer de ces réplications, nous avons choisi de les intégrer dans les descriptions. Les séparer aurait compliqué la compréhension de notre travail et aurait rendu abstraites certaines de nos conclusions.

L'ordre dans lequel nous avons réalisé ces expériences n'est pas celui d'Edmond Becquerel. En effet des difficultés particulières concernant la mise à disposition du matériel, ainsi que les conditions météorologiques, nous ont incité à modifier cet ordre. Toutefois, afin de rendre plus claire cette présentation, nous choisissons de présenter la description des différentes séries d'expérimentations dans l'ordre chronologique suivi par Edmond Becquerel.

L'ordre dans lequel nous avons réalisé ce travail de réplication est le suivant. La première étape a concerné la conception et la fabrication des différents instruments. Ce travail s'est déroulé de mars à juin 2004, en collaboration avec Daniel Fatet. Il a nécessité de comprendre, pour chaque appareil, au-delà des informations données par Edmond Becquerel, la forme et le processus de construction de chacun. C'est par l'analyse des utilisations possibles décrites par lui, que nous avons pu aborder ce problème. Toutefois, comme nous le préciserons au cours de ce chapitre, certaines

modifications ont été rendues nécessaires par les difficultés rencontrées lors de l'utilisation, qu'il nous était impossible de cerner par la seule analyse des textes.

Nous avons ensuite réalisé plusieurs séries d'expériences à l'aide de ces divers appareils. Le premier appareil que nous avons utilisé est l'appareil à deux compartiments. Puis nous avons poursuivi notre activité en menant des expérimentations à l'aide de l'actinomètre électrochimique. Finalement nous avons employé, dans une dernière série de manipulations, l'appareil à deux phases. Ce travail s'est déroulé de juin à septembre 2004.

La période sur laquelle s'est déroulé ce travail, sept mois au total, peut paraître longue. Les difficultés de réalisation qui se sont présentées, ainsi que les conditions météorologiques difficiles de l'été 2004, nous ont imposé ce délai.

Nous n'avons pas reproduit l'ensemble des expérimentations menées par Edmond Becquerel entre 1839 et 1843. Les difficultés de manipulations et de précision ne nous ont pas permis de mener à terme l'ensemble de ces travaux. Nous rappellerons simplement que les recherches d'Edmond Becquerel se sont déroulées sur quatre ans, durant lesquelles il est eu la possibilité de se familiariser avec les méthodes d'expérimentation qu'il a mises en œuvre. De plus, certaines spécificités de ces manipulations, telles que le simple usage de la chambre noire, correspondent à des pratiques expérimentales courantes à l'époque, auxquelles il était formé. Beaucoup de ces habitudes et de ses gestes se sont perdus. Ne les maîtrisant pas il nous a fallu les retrouver. Ces deux éléments additionnés ne nous ont pas permis d'atteindre la finesse et la précision des mesures qu'il obtient, dans le temps qui nous était imparti.

1. Le choix d'un lieu.

Trouver un lieu pour réaliser les manipulations que nous souhaitions faire a été une opération difficile. En effet, il était nécessaire pour y parvenir de disposer d'une chambre obscure, une pièce noire possédant une très mince ouverture obturable, exposée aux rayons solaires une grande partie de la journée, dans laquelle on peut créer le noir complet. Cette pièce doit être équipée d'un système d'eau courante et d'évacuation et pouvoir être ventilée sans pour autant laisser entrer la lumière. S'il semble que la plupart des laboratoires de physique du XIXe siècle disposaient de ce type d'équipement, aucun des laboratoires de physique et de chimie de l'université dans laquelle nous travaillons n'en dispose actuellement. Nous avons donc dû trouver un lieu

dans lequel nous pouvions effectuer les modifications nécessaires pour l'adapter aux conditions dont nous avions besoin. Nous avons installé notre équipement dans un laboratoire de développement photographique désaffecté qui nous a été prêté pendant la durée des manipulations par M. Raymond Ramousse, membre de l'équipe d'éthologie de l'université Claude Bernard.

Ce laboratoire comportait deux pièces. La première, totalement obscure disposait de l'eau courante et de l'évacuation des eaux usées, de plusieurs bacs conçus pour le développement photographique et d'un système de lumière rouge permettant de protéger les substances. Cependant aucun système de ventilation n'était disponible. Les manipulations que nous avons réalisées nécessitant l'usage des vapeurs de brome et d'iode dans l'obscurité totale, les conditions pratiques de travail se sont avérées extrêmement complexes.

La seconde pièce était équipée d'une petite lucarne exposée environ quatre heures par jour à la lumière solaire directe. Après avoir vidé, rangé et nettoyé cette pièce, c'est cette lucarne qu'il nous a fallu couvrir, afin de l'équiper d'un système de volet très fin permettant de faire pénétrer la lumière du Soleil lorsque nous le souhaitions. L'obscurité étant quasiment complète dans cette pièce même lors des manipulations, nous nous éclairions à l'aide d'une bougie placée le plus loin possible du montage.

La lumière du soleil était récupérée à l'aide d'un miroir placé à l'extérieur de la pièce, juste derrière la fente, par laquelle le faisceau formé par le miroir pénétrait dans celle-ci. Nous ne disposions pas d'héliostat afin de suivre la marche du soleil, la procédure que nous avons donc employée est identique à celle qu'Edmond Becquerel avait mise en place. Un assistant, Thomas Forissier, tournant le miroir en fonction du déplacement du soleil permettait que le faisceau pénètre toujours dans la pièce, et toujours selon la même direction.

Les chambres noires ayant disparu depuis longtemps des laboratoires, les procédures et les habitudes de travail dans ces lieux ont disparu elles aussi. Il nous a fallu apprendre à régler les miroirs, à l'intérieur comme à l'extérieur. Nous avons dû apprendre à travailler dans le noir presque complet, et à positionner notre matériel de manière à pouvoir effectuer à l'aide de la lumière de la bougie les lectures sur le galvanomètre, sans que cette lumière ne perturbe l'appareil. Pour cela, il faut placer le galvanomètre loin du détecteur de lumière. Mais l'utilisation du détecteur de lumière nécessitant l'ouverture et la fermeture rapide des cuves des appareils, et d'effectuer la lecture à ce

même instant, nous avons dû modifier un grand nombre de fois la disposition de notre matériel afin de rendre cela possible.

Nous n'avons pu rencontrer aucun physicien, même âgé, qui avait eu l'occasion de travailler en chambre obscure. Il semble cependant que ce travail nécessite de disposer d'assistants. Edmond Becquerel n'en cite qu'un seul, dont la fonction était de tourner le miroir à l'extérieur de la chambre.

Nous dirons simplement que travailler dans ce type de laboratoire est extrêmement fatigant. Il s'agit en effet d'une pièce obscure, totalement fermée, qui n'est quasiment pas ventilée, et reçoit par l'une de ses fenêtres, obstruée par un panneau, la lumière du soleil directe. Il y fait donc extrêmement chaud. Les manipulations que nous avons réalisées nécessitant l'utilisation de produits extrêmement toxiques et volatils, tels que le dibrome et le perchlorure de fer, en rendent l'atmosphère peu confortable.

2. Le choix de l'appareil de mesure.

Le choix de l'appareil de mesure a été lui aussi très complexe. Nous avons été dans l'impossibilité de nous procurer un appareil identique à celui qu'utilise Edmond Becquerel. Ceux que nous avons pu localiser dans plusieurs musées ou lieux de conservation de matériels anciens n'étaient pas dans un état de fonctionnement satisfaisant pour réaliser les expériences que nous souhaitions. Nous avons pu localiser plusieurs galvanomètres à fil long chez des antiquaires ou des marchands de matériels anciens. Les moyens dont nous disposions pour réaliser nos manipulations ne nous permettaient pas d'acheter ceux-ci, et aucun de ces commerçants n'a accepté de nous les prêter pour quelques mois. Nous nous sommes donc équipés de plusieurs types de galvanomètre, de différentes époques et de différents degrés de précision. Après avoir effectué des comparaisons de sensibilité pour ces différents appareils notre choix s'est porté sur un galvanomètre de marque Sefram, de modèle Vérivrac. Cet appareil présente l'avantage d'être d'une conception très simple, équipé d'un cadre mobile, et d'une bobine très longue. Son principe de fonctionnement correspond donc à celui d'Edmond Becquerel.

Il n'est équipé d'aucun système électronique de protection ou de contrôle. Le seul système électronique dont il dispose permet de faire varier le calibre de l'appareil. Nous avons donc choisi d'utiliser cet appareil en travaillant en permanence sur le même calibre afin de ne pas créer d'artefacts dans les mesures. Pour effectuer ce choix nous

avons placé l'appareil à deux compartiments, le premier que nous avons utilisé, dans les conditions maximales d'exposition à la lumière, en la concentrant à l'aide d'un miroir concave afin de la projeter sur l'appareil. Nous avons effectué cette opération en abaissant à chaque fois le calibre de l'appareil, jusqu'à atteindre un mouvement du spot maximal pour l'échelle concernée, mais permettant de mesurer sur la même échelle de graduation et sans modifier les réglages de l'appareil en cours d'expérimentation, le courant à la fois quand le système est conservé dans l'obscurité totale, et quand il subit un éclairement maximum. C'est en effet la différence entre ces deux mesures qui nous intéresse.

Une fois le calibre choisi, ce qui a nécessité plusieurs séries de mesures, nous étions donc placés dans des conditions sensiblement identiques à celles dans lesquelles travaillait Edmond Becquerel, concernant l'appareil de mesure. Le calibre que nous avons choisi, permettant d'effectuer l'ensemble des mesures pour les trois appareils est le calibre 500 microampères. L'échelle de mesure sur laquelle se déplace le spot lumineux étant gradué de 0 à 100, une déviation de 20 graduations correspond donc à un courant de 100 microampères.

Cet appareil a été utilisé, sur ce calibre, pour l'ensemble des manipulations que nous avons réalisées concernant la réplication des trois appareils d'Edmond Becquerel.

Les résultats numériques que nous donnerons des mesures que nous avons effectuées seront exprimées en graduation, et non pas en microampères. Edmond Becquerel donne ses résultats en degrés de déviation d'aiguilles de galvanomètre, l'unité dans laquelle on exprime les résultats n'a donc que peu d'importance. Exprimer les courants mesurés en intensité ne signifierait rien concernant le travail d'Edmond

Becquerel et ne nous permettrait pas de tirer des conclusions sur la grandeur des courants qu'il a mesurés. Nous utilisons en effet un appareil de mesure différent du sien aux caractéristiques internes nécessairement différentes aussi. De plus, et comme il le dit lui-même, l'importance de ces effets varie en fonction du temps pendant lequel on utilise les mêmes plaques, de la manière dont on les a préparé, et de l'épaisseur de la couche sensible. Nous nous intéresserons donc à la variation des courants en fonction de la variation des paramètres, et n'exploiterons les résultats que nous obtenons lors de la réplication qu'en les comparant entre eux au sein d'une même série de manipulations. C'est cette variation des résultats entre eux qui peut permettre de comparer le travail d'Edmond Becquerel au nôtre et en aucun cas les valeurs absolues des courants mesurés.

3. Le premier appareil à deux phases.

3.1. La fabrication de l'appareil

Afin de construire cet appareil, nous avions besoin d'un vase présentant un orifice à sa base permettant de relier la plaque de platine qui doit être immergée dans le liquide inférieur. Nous avons d'abord pensé utiliser un vase de chimie en Pyrex équipé d'un robinet à sa base. En enlevant le robinet nous pouvions ainsi faire passer un fil relié à cette plaque. Mais ce vase devait être « noirci intérieurement ». Edmond Becquerel ne précisant pas quelle technique il utilise pour noircir son vase, nous avons choisi d'utiliser une peinture noire extrêmement opaque. Il s'est avéré impossible de faire adhérer les différentes peintures que nous avons expérimentées à la surface du Pyrex. Une fois sèche la peinture noire se craquelait et se décollait, laissant filtrer la lumière, qu'on l'applique à l'intérieur ou à l'extérieur du récipient.

Nous avons alors orienté nos recherches vers un vase en verre, dont la surface plus rugueuse permettrait une meilleure adhérence de la peinture. Le récipient que nous avons utilisé est un vase destiné aux manipulations de chimie qui équipait aux environs des années 1920 le laboratoire d'un établissement d'enseignement secondaire. Ce laboratoire réformant du matériel nous a en effet permis de récupérer celui-ci. Il nous a alors fallu perforer ce vase à sa base afin de pouvoir y glisser une partie de la plaque de platine. L'épaisseur du verre le constituant rendait impossible son chauffage au rouge. Nous avons donc dû le perforer à l'aide d'une perceuse équipée d'un foret

spécifiquement adapté au travail sur verre, et tournant à vitesse minimum, afin d'éviter que les vibrations ne le fissurent.

Une fois l'orifice réalisé, nous l'avons recouvert, non pas intérieurement mais extérieurement, afin de s'assurer que cela ne crée pas de réactions parasites, de six couches d'une peinture noire extrêmement opaque, qui cette fois adhérait parfaitement à la surface.

Fig 1 : Vase utilisé lors de nos manipulations

Les plaques de platine que nous avons utilisées nous ont été prêtées par le laboratoire de physicochimie industrielle de l'INSA de Lyon, sous la direction de Jean-Pierre Millet. N'ayant pas à notre disposition de fils de platine permettant de relier les plaques à l'extérieur de l'appareil, nous avons modifié la forme de ces plaques afin qu'une partie de celles-ci se trouve à l'extérieur de l'appareil. Ainsi à l'intérieur du vase ne se trouvait que du platine, et aucun autre métal servant à la connexion.

Une fois la plaque introduite dans l'orifice inférieur, nous avons colmaté celui-ci

à l'aide d'une pâte inerte destinée à l'étanchéification des montages de chimie. Chacune de ces plaques, l'une pénétrant dans le vase par l'orifice inférieur, l'autre y pénétrant par le haut, était reliée, par l'intermédiaire de fils de cuivre spécialement destiné aux montages électriques de précision, aux bornes d'un galvanomètre très sensible.

Fig 2 : plaques utilisées lors de nos manipulations

3.2. La mise en place de l'expérimentation.

Il nous a ensuite fallu superposer les deux liquides l'un sur l'autre à l'intérieur du vase. La manipulation que nous avons reproduite concerne la réaction qui s'effectue sous l'effet de la lumière entre le perchlorure de fer et l'alcool. Nous avons rempli le vase à la moitié de sa hauteur avec de l'éthanol commercial. Nous avons ensuite utilisé un entonnoir dont nous avons appuyé l'extrémité très fine au fond du vase. Nous avons ensuite versé très lentement la dissolution de perchlorure de fer à l'intérieur de l'entonnoir, afin que ce liquide s'écoule très lentement dans le fond du vase. Cette dissolution ayant une densité supérieure à celle de l'alcool, si l'écoulement est assez lent, le liquide se dispose en dessous de la couche d'alcool sans quasiment se mélanger.

Cette opération est extrêmement délicate, et la réussir nécessite une précision très difficile à mettre en œuvre lorsque l'on opère dans le noir. Vérifier que les liquides ne sont pas mélangés, et que l'interface est très nette est une opération complexe puisqu'elle se déroule dans l'obscurité, et que le vase est opacifié. Il nous a fallu la répéter plusieurs fois, avec de nouvelles doses de chacun des liquides, pour obtenir une interface suffisamment nette pour y voir se former la réaction.

La réussite de cette opération doit se produire plusieurs heures avant le début de l'utilisation de l'appareil, afin que l'équilibre électrochimique s'établisse. En effet, comme le signal Becquerel, dans les deux premières heures suivant l'introduction des liquides un courant se produisait dont il fallait attendre la stabilisation pour pouvoir travailler. Plusieurs jours consécutifs cette stabilisation n'a pas eu lieu suffisamment rapidement pour que l'on puisse opérer avec l'appareil dans les rares moments ensoleillés de la période où nous avons travaillé.

L'utilisation de cet appareil, ainsi que des autres appareils proposés par Edmond Becquerel, nécessite en effet d'avoir une lumière solaire directe. Il est impossible de travailler avec une lumière diffuse filtrée par un voile nuageux.

3.3. La réalisation des expériences

Lorsque toutes les conditions nécessaires au bon fonctionnement de l'appareil ont été remplies, c'est-à-dire stabilisation électrochimique et un bon éclairement, nous avons pu réaliser plusieurs séries de manipulations. Nous avons d'abord réalisé les deux expériences de vérification que fait Edmond Becquerel, en exposant le vase ne

contenant qu'un seul de chaque liquide à la lumière, pour vérifier si un courant se produisait. Nous n'en avons observé aucun.

De la même manière qu'Edmond Becquerel nous avons ensuite effectué des mesures d'effets électriques produits pour le mélange décrit plus haut en lumière diffuse, puis avec le vase exposé à la lumière solaire directe, et enfin en y projetant un faisceau de lumière concentrée à l'aide d'un miroir concave. Le filtre en verre que nous avons utilisé est un morceau de verre ordinaire de 0,8 mm d'épaisseur.

Nous avons réalisé cette expérience, comprenant une série de 12 mesures, quatre fois. Ces quatre séries ont été réalisées sur plusieurs jours. Les conditions d'éclairement devant être autant que possible les mêmes pour toutes les mesures nous avons choisi de n'en effectuer que deux de chaque type lors de chaque série de manipulations, afin que la durée totale de l'expérimentation n'excède pas deux heures, et que nous puissions considérer l'éclairement comme sensiblement constant. Nous avons à chaque fois obtenu les mêmes résultats.

Nous choisissons de présenter les résultats que nous avons obtenus dans un tableau ayant la même organisation et les mêmes intitulés que celui que publie Edmond Becquerel en 1839. Les résultats que nous avons obtenus sont les suivants :

Perchlorure de fer. Alcool	Ecrans	Graduation du galvanomètre, L'appareil étant :		Intensité du courant
		A l'obscurité	A la lumière	
1ière expérience lumière diffuse	Sans écran	76	90	14
		78	91	13
	Verre blanc	74	82	8
		74	81	7
2ième expérience lumière directe	Sans écran	49	60	21
		51	60	19
	Verre blanc	60	74	14
		61	75	14
3ième expérience lumière concentrée par un miroir concave	Sans écran	33	63	30
		39	70	31
	Verre blanc	44	69	25
		47	71	24

Tableau 1 : Mesures obtenues lors de la réplication de l'appareil à deux phases

Les résultats que nous obtenons sont sensiblement les mêmes dans cette expérience que ceux obtenus par Edmond Becquerel en 1839. Ils mettent en évidence que plus la lumière est intense plus l'effet provoqué sur la réaction est important, et que l'interposition d'un filtre en verre atténue un peu ces effets. La concordance de ces résultats avec ceux de Becquerel est bonne.

Lorsque la réaction se produit à l'interface, on observe plusieurs phénomènes liés à la réaction chimique. D'une part un dégagement gazeux se produit autour de l'électrode qui plonge dans le perchlorure de fer. D'autre part un solide se forme à l'interface, et surnage au-dessus du perchlorure de fer, il semble donc moins dense.

Nous n'avons pas été en mesure d'établir quelles réactions se produisent dans cette manipulation. Il semble qu'elles soient relativement complexes. Plusieurs réactions semblent en concurrence, ou enchaînées, les produits de l'une servant de réactifs à la suivante. Lorsque la réaction est terminée, il semble qu'il se soit formé un chlorure de fer de degré d'oxydation inférieur. Nous n'avons pas pu récupérer le gaz formé à l'électrode, il ne nous a donc pas été possible de l'analyser ultérieurement. La réaction se produisant sous l'influence de la lumière, il s'agit probablement d'une réaction de type radicalaire. Dans ce cas, il y a probablement remplacement d'un atome d'hydrogène au moins de l'éthanol par un atome de chlore. Le gaz qui se forme serait alors un mélange de dihydrogène et de dichlore dû à la recombinaison de ces deux radicaux.

Lors de la réalisation de ces expériences plusieurs difficultés se sont présentées. D'une part, même si l'on n'ouvre le vase pour y laisser entrer la lumière que pendant un temps très bref, il semble que la réaction se poursuive quelques minutes après la fermeture du vase. Le spot met en effet plusieurs minutes à se stabiliser de nouveau. Le courant diminue lentement, et il faut attendre entre deux mesures la stabilisation de la réaction. C'est pourquoi la deuxième mesure à l'obscurité de chaque série est plus élevée que la première. Ceci vient conforter notre hypothèse d'une réaction radicalaire.

D'autre part, dans chaque série de manipulations, lors des mesures effectuées en lumière solaire directe, et en lumière solaire concentrée de manière encore plus intense, l'éclairement semble provoquer un échauffement local des liquides et en particulier de l'alcool. Cet échauffement déclenche un mouvement du liquide qui provoque un mélange plus ou moins important à la surface de séparation. La réaction photochimique se produit alors de manière beaucoup plus intense, et semble se poursuivre, peut-être

sous l'effet de l'échauffement, bien après qu'on ait refermé le vase. Il faut, pour éviter ces difficultés, écourter au maximum le temps pendant lequel on éclaire l'interface. Mais même lorsque ce délai est très court, l'échauffement a lieu, et il faut attendre un temps beaucoup plus long pour que le spot du galvanomètre se stabilise de nouveau, que lorsque l'on travaille en lumière diffuse.

Edmond Becquerel ne mentionne pas ce problème dans les descriptions de ses manipulations. Il est pourtant probable qu'il l'ait rencontré puisqu'il expose lui aussi ses vases à une lumière concentrée.

Nous avons ensuite, de la même manière qu'Edmond Becquerel l'a fait, cherché « l'ordre des écrans » qui atténuent les effets de la lumière sur la réaction. Les filtres que nous avons utilisés ne sont pas, comme Edmond Becquerel des verres colorés, mais des filtres plastifiés de marque Jeulin, destinés à l'analyse de la lumière pour l'enseignement de la physique. Nous ne sommes pas parvenus à obtenir de résultats probants concernant cette expérience. En effet, en lumière diffuse, lorsque le vase est couvert par un filtre, nous n'obtenons quasiment pas d'effets mesurables. Lorsque l'on opère en lumière solaire directe, l'effet que nous avons décrit plus haut, et que nous interprétons comme un effet d'échauffement local des liquides, fausse les mesures effectuées. L'ordre des écrans que nous avons obtenu en fonction de l'intensité des effets ne correspond donc ni à celui décrit par Becquerel, ni à celui décrit par Meloni. Aucune cohérence n'apparaît dans celui que nous avons obtenu.

Nous avons tenté d'ajouter au montage un filtre infrarouge permettant de limiter cet effet d'échauffement. Nous avons pu observer que, même avec la lumière concentrée à l'aide du miroir concave, la variation de courant est beaucoup moins importante, et le mélange à l'interface beaucoup plus faible. L'hypothèse d'un courant provoqué par l'échauffement du liquide semble donc confirmée.

Mais lorsque nous avons essayé de superposer ce filtre aux filtres colorés dont nous disposions, les effets produits étaient trop atténués pour être pris en considération. Ils étaient du même ordre de grandeur que les variations permanentes du spot. Nous n'avons donc pas pu prendre en compte ces résultats qui, quoi qu'il en soit, correspondaient à un montage considérablement différent de celui d'Edmond Becquerel.

Au-delà de cet échec, il semble important de s'interroger sur les moyens qu'a pu mettre en œuvre Edmond Becquerel pour parvenir à des résultats en s'affranchissant de cet effet d'échauffement. Rien dans ce texte ne le mentionne, mais rien non plus ne

permet d'identifier un procédé spécifique évitant celui-ci. La seule explication que nous pouvons apporter concerne la date à laquelle ont été réalisées les expérimentations. Le mémoire décrivant ces expériences présentées par Edmond Becquerel à l'Académie des sciences est daté du 30 juillet 1839. Il est donc probable qu'il ait réalisé ses expériences quelques mois auparavant, en hiver ou au printemps. La lumière qu'il employait aurait alors exercée un effet d'échauffement bien moins important que celle de la fin du mois d'août, période à laquelle nous avons opéré.

4. L'appareil à deux compartiments.

4.1. La fabrication de l'appareil

Afin de répliquer l'appareil à deux compartiments, il nous fallait construire une boîte en bois de 10 cm de côté. Ne disposant que de très peu d'informations concernant la constitution même de cet appareil, notre approche a dû être principalement basée sur des hypothèses et des rapprochements. Nous avons choisi d'utiliser le bois de chêne. Ce bois nous semblait être le seul à présenter une densité et une dureté suffisamment importante pour résister à un contact prolongé avec l'eau sans manifester de déformation trop importante. De plus, les catalogues d'instruments de l'époque, lorsqu'ils décrivent des instruments comportant des parties en bois, signalent la plupart du temps l'utilisation de chêne.

Nous avons réalisé une première boîte en chêne constituée d'un fond comportant des rainures, dans lesquelles s'emboîtaient les quatre faces verticales de la boîte. Ces quatre faces étaient réunies entre elles à l'aide de clous, et l'ensemble des joints colmatés à l'aide de gomme arabique.

Fig 3 : Cuve à deux compartiments utilisée lors de nos manipulations

Cette boîte comportait une cloison intermédiaire très fine en chêne elle aussi, la partageant en deux compartiments. Cette cloison ne descendant pas jusqu'au fond de la boîte, laissait la possibilité au liquide qu'elle devait contenir de circuler librement entre les deux compartiments, et ainsi de permettre l'équilibre chimique en permanence.

Le dessus de cette boîte était équipé de deux volets coulissants, un pour chaque compartiment, permettant d'éclairer l'un des deux, en conservant le second dans l'obscurité. L'une des faces verticales de la boîte était traversée de deux tiges d'acier inoxydable, pénétrant chacune dans un compartiment. Ces tiges permettaient de fixer horizontalement les plaques de métal et de les relier, à l'extérieur de la boîte, au galvanomètre. N'ayant à notre disposition ni tiges d'argent ni de platine, nous avons choisi d'utiliser l'acier inoxydable afin de disposer d'un bon conducteur, et de s'assurer qu'aucune réaction photochimique sur les oxydes de ces tiges ne se produise. Les orifices par lesquelles pénétraient ces tiges, ajustés le plus précisément possible au diamètre de celles-ci, étaient étanchés à l'aide de gomme arabique.

Nous n'avons dans un premier temps pas jugé nécessaire de noircir intérieurement la boîte, comme le décrit Becquerel, puisqu'elle était parfaitement obscure. De plus il ne précise pas de quelle manière celle-ci est noircie.

Les plaques que nous avons utilisées pour réaliser les différentes expériences à l'aide de ces appareils sont d'une part les plaques de platine utilisées précédemment, d'autre part des plaques d'argent très pur de 2,5 cm de large sur 5 cm de long, pour une épaisseur d'un quart de millimètre. Ces dimensions sont celles des plaques d'argent utilisées dans l'actinomètre électrochimique. N'ayant pas d'informations sur la taille de celles utilisées dans cet appareil, nous avons choisi d'utiliser les mêmes.

Nous avons ensuite dû remplir cette boîte « d'eau légèrement acidulée ». Les seules précisions que nous trouvons sur la quantité d'acide ajouté à l'eau, apparaissent dans le mémoire de 1851[83]. Nous avons considéré cette donnée comme valide pour les instruments et les expériences précédents, puisque que nous ne disposions pas d'informations supplémentaires. Il dit dans ce mémoire utiliser un mélange de 2 g d'acide sulfurique pur à 66°, et de 100 g d'eau. Un acide à 66° Baumé correspond à un acide à 96 %. 2 g d'acide sulfurique à 66° Baumé donc représentent 1,92 g d'acide sulfurique pur, soit $1{,}96.10^{-2}$ mole pour 100 g d'eau. Considérant que le volume de l'acide ajouté, par rapport à celui de l'eau est négligeable, nous avons donc préparé une grande quantité d'acide sulfurique dilué à $1{,}96.10^{-1}$ moles par litre. C'est ce mélange que nous avons utilisé pour remplir la cuve de cet appareil ainsi que celle de l'actinomètre électrochimique, lors de notre travail d'expérimentation.

Une difficulté inattendue est alors survenue. Le bois de chêne employé pour la fabrication de la boîte a libéré une grande quantité de tanins de chêne dans le liquide. Ceci pose plusieurs problèmes. D'une part, il semble que le tanin de chêne présente une réactivité sous l'effet de la lumière. En effet, lorsque nous avons exposé la boîte contenant le liquide à la lumière du soleil, sans plaques, en ouvrant un seul des compartiments nous avons pu mesurer un courant, faible, mais qui pouvait provoquer des perturbations dans les expérimentations auxquelles était dédié cet appareil. Nous n'avons trouvé aucune information qui puisse nous permettre de certifier cette réactivité des tanins du chêne à la lumière solaire.

D'autre part, et c'est le désagrément le plus important, les tanins du chêne colorent le liquide contenu dans la boîte en violet, en se répandant dans celui-ci. Au bout de deux heures de contact, le liquide présente une coloration extrêmement foncée.

[83] Becquerel, E. (1851). "Note relative aux effets électrochimiques produits sous l'influence de la lumière solaire." Annales de chimie et de physique **32**(3ième série): 176-194.

Les expériences que nous souhaitions mener à l'aide de cet appareil consistaient à éclairer une plaque immergée dans ce liquide avec de la lumière solaire. La lumière devait donc traverser le liquide avant de frapper la plaque. Le fait que ce liquide soit coloré risquait donc de provoquer des modifications sur celle-ci, faussant les résultats.

Il nous a fallu trouver un moyen d'éliminer ces tanins afin d'éviter ces effets. Dans ce but nous avons pris contact avec plusieurs employés expérimentés de la tonnellerie artisanale Billon, situé à Beaune en côte d'or. Il nous a semblé en effet que les tonneliers devaient disposer de moyens pour éviter que le tanin du chêne se répande dans le liquide que contiennent les tonneaux qu'ils fabriquent. Nous souhaitions de plus connaître des moyens traditionnels d'effectuer cette opération, qui a probablement été nécessaire lors de la réalisation de ces appareils à l'époque.

Les tonneliers emploient plusieurs techniques pour éliminer la majeure partie des tannins du chêne. La plus efficace est de baigner le bois dans de l'eau très chaude. Cette technique, la première que nous avons employée, donne de bons résultats. Après avoir rempli la boîte puis laissé refroidir l'eau à l'intérieur de celle-ci avant de la vider une vingtaine de fois, l'eau ne se colore plus que très peu. La seconde technique, que nous avons employée ensuite, consiste à exposer l'intérieur du tonneau, ou de la boîte pour nous, à une flamme vive. La chaleur permet en effet de transformer les tanins en acide gallique, et en phénol-cétones. La réaction qui se produit semble très complexe, et nous n'avons pu l'établir. Si l'on couple ces deux techniques en lavant d'abord puis en chauffant, on parvient à éviter totalement la présence de tanin dans le liquide.

Ce point semble particulièrement intéressant. En effet, lorsque l'on a achevé le chauffage de l'intérieur de la cuve, on observe que le bois est noirci. Ceci peut expliquer pourquoi, alors que cela semblait inutile, l'intérieur de la boîte à deux compartiments d'Edmond Becquerel est « noircit intérieurement ». Mais le fait qu'il ne signale pas les raisons pour lesquelles cette opération a été réalisée est surprenant. Cela nous conduit à envisager qu'il a, pour concrétiser la réalisation de ces appareils, fait appel à un professionnel, et qu'il n'a pas participé à la construction elle-même. Son père travaillant en collaboration étroite avec le fabricant d'instruments Chevalier, il est probable qu'Edmond Becquerel ait fait appel à lui. Nous n'avons pas été en mesure d'établir ce fait, qui restera donc à l'état d'hypothèse. Cependant les effets des tanins semblent être tellement importants, qu'Edmond Becquerel les aurait probablement signalés, s'il les avait rencontrés.

Une fois ce problème résolu, il ne nous restait qu'à fixer horizontalement les plaques à l'intérieur de la cuve afin de débuter les expérimentations.

4.2. La mise en place de l'expérimentation

Le premier effet que nous souhaitions étudier concernait les résultats qu'obtient Edmond Becquerel avec des plaques de platine non décapées. Nous avons donc réalisé cette expérience en premier, en utilisant directement les plaques que nous nous étions procurées. Celles-ci, n'ayant pas été utilisées depuis plusieurs années, avaient séjournées dans un tiroir tout ce temps sans subir le moindre traitement. Nous avons introduit les plaques dans la boîte à deux compartiments sans les décaper ou les chauffer afin de réaliser cette analyse.

Il faut tout d'abord noter que, comme dans l'appareil précédent, lorsque l'on a introduit les plaques, reliées aux bornes du galvanomètre, il est nécessaire d'attendre un certain temps avant que l'équilibre s'établisse. Cette étape créée des difficultés. En effet, l'équilibre nécessitant plusieurs heures pour s'établir, le bois de la boîte gonfle et se déforme, ce qui provoque des fuites importantes. Nous avons tenté de colmater ces fuites à l'aide de gomme arabique, puis ce procédé n'étant pas suffisant nous avons tenté d'utiliser une pâte silicone moderne. Aucune de ces tentatives n'a permis de limiter réellement les fuites. La boîte se vidait en moins de deux heures, l'équilibre n'ayant pas le temps de s'établir. Lorsque nous la remplissions, nous déséquilibrions l'ensemble, ce qui nécessitait de prolonger le temps d'attente.

Il nous a fallu construire une nouvelle boîte en modifiant le système d'ajustement des faces verticales. Nous avons réalisé des tenons et des mortaises sur toute la longueur des extrémités de ces faces, afin qu'elles s'emboîtent les unes dans les autres, et s'emboîtent toutes ensemble dans le fond de la boîte.

Fig 4 : détail de l'assemblage

Ainsi lorsque le bois gonflait, le gonflement des tenons dans les mortaises permettait d'augmenter l'étanchéité. Ce procédé associé à la gomme arabique, nous a permis de travailler avec une boîte étanche.

4.3. La réalisation des expériences

Nous avons donc réalisé nos premières mesures à l'aide de cette boîte, mise dans les conditions décrites précédemment, sur des plaques non décapées, n'ayant subies aucun traitement pendant plusieurs années. Les premiers résultats que nous avons obtenus étaient absolument incohérents. Lors de l'éclairement d'une seule de ces plaques, en envoyant la lumière solaire directe à l'aide d'un miroir à l'intérieur d'un des compartiments, l'autre restant fermé, les courants mesurés par le galvanomètre étaient d'une intensité telle que le spot était chassé au-delà de l'échelle de mesure, parfois dans un sens, parfois dans l'autre. Il était impossible de faire des relevés, et rien n'a pu nous permettre de déterminer ce qui influençait le changement de sens du courant.

Nous avons alors sorti les plaques de l'appareil, nous les avons décapées, chauffé au rouge, puis les avons abandonnés à l'air libre pendant deux jours. Les remettant dans l'appareil et renouvelant l'expérience décrite, avec la même source de lumière, nous avons mesuré un courant lors de l'éclairement, qui s'annulait lorsque nous refermions la trappe. Voici les résultats que nous avons obtenus lors des mesures (comme précédemment nous ne donnerons les valeurs mesurées qu'en graduation) :

Numéro de la mesure	À l'obscurité	Plaque éclairée
1	40	46
2	41	46
3	40	45
4	39	45

Tableau 2 : Mesures obtenues lors de la réplication de l'appareil à deux compartiments, avec des plaques de platine non-décapées.

Il semble donc que la couche d'impureté à la surface des plaques ne doive pas être trop épaisse pour que l'on obtienne des résultats cohérents. Cela peut aussi nous permettre de conclure qu'il faut décaper les plaques lors de chaque utilisation, et immédiatement avant. La couche réagissant à la lumière se forme apparemment relativement vite.

Avant de réaliser les mêmes mesures avec des plaques parfaitement décapées, nous avons cherché « *l'ordre des écrans* » correspondant à ces effets en utilisant de nouveau les filtres Jeulin. Nous avons aussi recherché l'influence de l'épaisseur du filtre

en utilisant des morceaux de verre ordinaire de différentes épaisseurs. Voici les résultats que nous avons obtenus :

filtres utilisés	à l'obscurité	Plaque éclairée	Différence
Verre 0,5 mm	41	46	5
Verre 1 mm	39	43	4
Verre 2 mm	41	45	4
Filtre violet	43	46	3
Filtre bleu	42	43	1
Filtre vert	40	40	0
Filtre jaune	39	39	0

Tableau 3 : Mesures obtenues lors de la réplication de l'appareil à deux compartiments, avec des plaques de platine non-décapées, sous l'effet des filtres colorés.

Nous avons organisé les résultats de manière à les présenter dans ce tableau de l'effet le plus fort vers l'effet le moins fort. Les mesures n'ont pas été réalisées dans cet ordre, et ont nécessité un temps d'attente d'environ 20 minutes entre chaque mesure. Les variations mesurées étant très faibles, il était en effet nécessaire d'attendre entre chacune d'elles que le spot se stabilise complètement, son simple mouvement de descente lente pouvant se confondre avec les effets mesurés.

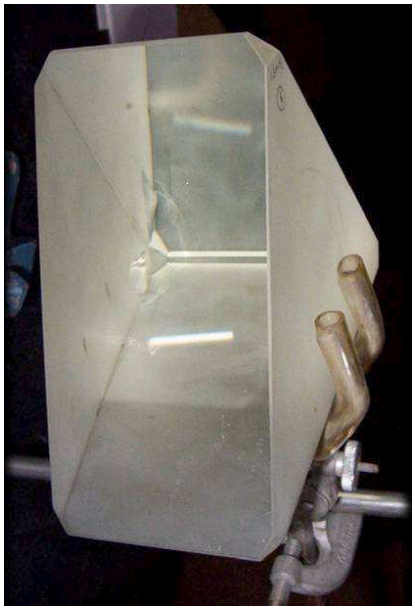
Les résultats que nous obtenons sont identiques à ceux que Becquerel publie concernant l'ordre des écrans. L'intensité est plus importante pour les rayons les plus réfrangibles. Nous pouvons cependant observer une diminution de l'intensité des effets lorsque l'épaisseur du verre augmente, alors que Becquerel n'en observe pas. Mais cette variation ne peut probablement pas être considérée comme significative étant donnée la faible intensité globale des effets mesurés.

Après avoir réalisé cette série d'expérimentations nous avons décapé les plaques complètement en les plongeant pendant une heure dans un bain d'acide nitrique, puis en les chauffant au rouge, chauffage assez facile à observer, puisque dans la pièce dans laquelle nous travaillions, la seule source de lumière était la lampe à alcool utilisée pour celui-ci.

Immédiatement après cette opération nous avons replacé les lames dans la cuve, à l'obscurité puis avons de nouveau attendu l'équilibre. Une fois celui-ci obtenu, nous

avons éclairé l'une de ces deux plaques à l'aide de la lumière solaire directe, puis à l'aide de la lumière filtrée par le filtre violet. Nous n'avons mesuré aucun effet, bien que nous ayons répété cette opération plusieurs fois.

Nous avons ensuite voulu réaliser les expériences qu'Edmond Becquerel effectue avec des plaques de laiton dont une seule est oxydée. Nous avons utilisé comme plaques deux morceaux de laiton de serrurerie. Après les avoir décapés, nous les avons plongés dans un becher contenant de l'eau, chacune d'entre elles étant reliée aux bornes d'un générateur de courant continu délivrant une tension de 12 V et une intensité de 2 A. La plaque reliée au pôle positif du générateur s'est effectivement oxydée. Mais l'oxydation à sa surface est extrêmement irrégulière, présentant des zones où la couche d'oxyde était épaisse et d'autres où elle ne s'était pas formée du tout. Nous avons reproduit l'opération plusieurs fois en redécapant les plaques. Nous ne sommes pas parvenus à obtenir une couche d'oxydation régulière à la surface de la plaque. Nous avons alors décidé de tenter l'expérience avec celle-ci. Edmond Becquerel utilise une pile de trente éléments. Il est probable que notre générateur, plus puissant, générait des effets plus rapides que le sien, mais aussi plus irréguliers. Nous avons donc fixé ces deux plaques horizontalement dans la cuve décrite précédemment.



Edmond Becquerel réalise cette expérience en décomposant la lumière avec un prisme, puis en projetant successivement les différentes zones du spectre sur la plaque. Nous avons utilisé un prisme en flint glass de très bonne qualité, prélevé dans un spectromètre électronique hors d'usage. Nous l'avons positionné verticalement afin de pouvoir projeter le spectre sur le dessus de la cuve. En interceptant celui-ci à l'aide d'un écran percé d'une fente d'un centimètre de largeur, nous pouvions sélectionner la zone du spectre que nous souhaitions faire pénétrer à l'intérieur de la cuve.

Fig 5 : prisme utilisé lors de nos manipulations

Afin de positionner l'ouverture de la cuve en face de la lumière nous l'avions déposé sur un plateau élévateur équipé de crémaillères permettant de faire monter et

descendre la cuve et de la déplacer d'avant en arrière très délicatement. Le spectre que nous avons obtenu mesurait environ 30 cm de long. Nous avons pu effectuer six mesures régulièrement réparties dans le spectre, que nous identifiions par la couleur de la lumière envoyée dans la cuve. Cependant, n'ayant aucun repère dans le spectre que nous puissions prendre, et ne connaissant pas la position des couleurs qu'Edmond Becquerel lui-même a envoyées, nous ne pouvons nous référer qu'au nom des couleurs qu'il donne, qui relève d'une appréciation totalement subjective. Nous avons reproduit cette expérience quatre fois. En notant sur la table à la craie la position de l'écran pour chacune des mesures nous pensons avoir envoyé dans la cuve pour chaque série de mesures approximativement les mêmes zones du spectre. Toutefois les modifications, mêmes faibles, qui sont survenus lors de l'expérimentation dans la direction de la lumière incidente, ont nécessairement provoqué une modification de la direction de la lumière diffractée. Les zones du spectre envoyées dans chaque série de manipulations étaient donc probablement légèrement différentes. Nous ne présenterons ici qu'une seule série de mesures, toutes ayant sensiblement données les mêmes résultats.

Couleur de la lumière	Déviation mesurée
Rouge	2
Orange	2
Jaune	2
Verte	2
Bleue	2
Violette	0

Tableau 4 : Mesures obtenues lors de la réplication de l'appareil à deux compartiments, avec des plaques de laiton, dont l'une est oxydée.

Nous n'avons pas observé, contrairement à Becquerel, d'effet particulièrement marqué pour la lumière verte. Dans toutes les séries d'expériences que nous avons effectuées, les déviations étaient sensiblement du même ordre pour toutes les couleurs, à part pour la lumière violette, que nous avons prise à l'extrémité visible du spectre, pour laquelle nous n'avons jamais obtenu de déviation.

Les deux plaques étant, dans cette situation, de compositions chimiques partiellement différentes, puisque l'une est oxydée et l'autre ne l'est pas, le courant qui

apparaît lorsque l'on met pour la première fois les plaques dans la cuve, dans l'obscurité complète, est très important. Il faut attendre plusieurs heures pour que la descente lente du spot, et donc la diminution du courant, s'apaise. L'importance des déviations mesurées étant faible, si l'on n'attend pas que le spot cesse quasiment sa descente, ou du moins que sa vitesse soit suffisamment lente, la déviation provoquée par l'éclairement est annulée par la descente du spot et n'est pas lisible.

La question principale qui se pose concerne l'établissement de cet équilibre. Il doit probablement consister en un rééquilibre chimique entre les deux plaques, qui annule la différence que nous avions créée à l'aide du générateur. Lorsque l'on ressort les deux plaques de l'appareil après la manipulation, on peut constater que celle qui est restée dans l'obscurité en permanence, qui n'était pas oxydée au départ, est recouverte après plusieurs heures dans la cuve, lorsque le circuit est fermé, d'une couche d'oxyde qu'elle ne présentait pas au départ. Si l'équilibre que nous attendons, pour pouvoir débuter les manipulations, nécessite que les deux plaques soient oxydées, ce qui paraît nécessaire pour que le système soit électrochimiquement stable, on peut se demander quel intérêt cela représente de n'oxyder qu'une seule des deux plaques. On aurait pu opérer avec trois plaques, dont l'une ne servant que d'électrode négative lors de l'oxydation, ne pénétrerait jamais dans la cuve. On introduirait alors deux plaques oxydées dans celle-ci. Nous n'avons pas réalisé cette expérience qui pourrait permettre de diminuer le temps d'attente de l'équilibre avant le début de la manipulation. Quoi qu'il en soit à aucun moment Edmond Becquerel dans ses publications ne décrit ce phénomène.

Nous avons ensuite reproduit la même expérience en utilisant cette fois des plaques d'argent recouvertes d'halogénure d'argent. Nous avons reproduit la série d'expériences trois fois, une fois avec du bromure d'argent, une fois avec de l’iodure d'argent, une fois avec du chlorure d'argent.

La préparation de la plaque d'argent recouvert de chlorure d'argent est assez simple, bien qu'elle nécessite de travailler dans une obscurité quasi complète. Il suffit de recouvrir la plaque d'une couche de chlorure d'argent en solution en utilisant une pipette jaugée et de l'étaler sur toute sa surface. On la chauffe ensuite au-dessus de la flamme d'une lampe à alcool, jusqu'à ce que l'eau soit entièrement évaporée. La préparation de la couche d'iodure d'argent et de bromure d'argent et plus périlleuse. Il faut exposer la plaque aux vapeurs de diode ou de dibrome, dans l'obscurité complète. Lorsque l'on

récupère ces plaques au bout d'une quinzaine de minutes d'exposition, l'atmosphère de la pièce dans laquelle nous avons réalisé l'exposition est extrêmement corrosive et toxique. Comme nous l'avons déjà dit, il est en effet extrêmement difficile de ventiler une pièce dans laquelle on veut conserver l'obscurité totale.

Nous avons successivement placé dans le compartiment destiné à recevoir la lumière chacune de ces plaques, l'autre compartiment contenant une plaque d'argent parfaitement décapée qui reste à l'obscurité.

De la même manière que précédemment le courant qui apparaît lorsque l'on ferme le circuit, dans l'obscurité, est très intense. Il faut attendre plusieurs heures avant que la descente du spot soit assez lente pour que l'on puisse manipuler. Pour chaque plaque nous avons effectué cinq séries de mesures consécutives afin de vérifier la durée des effets. Nous ne présenterons dans le tableau suivant que les résultats de la première série réalisée pour chaque plaque (les chiffres représentent le nombre de graduations dont a été dévié le spot lors de l'exposition) :

couleurs de la lumière	Plaque recouverte d'iodure d'argent	Plaque recouverte de chlorure d'argent	Plaque recouverte de bromure d'argent
Rouge	3	2	5
Orange	5	2	7
Jaune	12	5	10
Vert	10	10	15
Bleu	31	25	41
Violet	37	27	60

Tableau 5 : Mesures obtenues lors de la réplication de l'appareil à deux compartiments, avec des plaques d'argent, dont l'une est recouverte d'halogénures d'argent.

On observe effectivement que le bromure d'argent produit des courants beaucoup plus importants que les deux autres halogénures. Mais il semble que l'iodure d'argent produise des courants plus importants que le chlorure d'argent, ce qu'Edmond Becquerel ne signale pas. Il identifie ces effets comme sensiblement identiques. Lorsque nous avons reproduit plusieurs fois consécutives chacune de ces séries d'expériences nous avons pu observer que pour l'iodure et le chlorure d'argent, même après cinq répétitions de ces mesures, les effets restent du même ordre de grandeur. Pour le

bromure d'argent, dès la troisième exposition, les effets sont quasiment divisés par deux et atteignent le niveau d'effet produit par le chlorure d'argent.

Comme dans l'expérience précédente, le fait que les lames n'aient pas la même composition, nécessite d'attendre un temps assez long pour que la descente du spot devienne suffisamment lente pour pouvoir réaliser les expérimentations. Il nous a fallu attendre quatre heures pour pouvoir réaliser les mesures avec le bromure d'argent. Ce délai très long n'ayant pas été pris en compte lors de l'installation du système, la stabilisation ne s'est produite qu'après la disparition de la source de lumière, le soleil, et nous avons dû recommencer l'ensemble de l'opération le lendemain.

La réalisation de ces expériences est extrêmement complexe et il nous a fallu, avant de réussir cinq séries d'expériences consécutives fiables, un grand nombre d'essais. Ces expérimentations nécessitent en effet d'ouvrir la trappe et d'effectuer la lecture sur l'appareil en même temps, de refermer très rapidement la trappe, de déplacer l'écran afin de changer le type de lumière envoyée, de déplacer la cuve à l'aide de la crémaillère pour que la lumière sélectionnée pénètre dans celle-ci, puis à nouveau d'ouvrir la trappe pour qu'elle y pénètre. Il faut parvenir à réaliser 30 fois consécutives cette série d'opérations, en attendant la stabilisation du spot entre chaque mesure, mais suffisamment rapidement pour que la source de lumière ne se modifie pas trop en intensité et en direction. La modification de l'intensité n'étant pas étudiée dans cette expérience, la modification de direction nécessitant de déplacer l'ensemble élévateur-cuve afin de se placer de nouveau dans la direction de la lumière. Il faut pour parvenir à la réalisation de cette expérience de manière efficace une grande maîtrise du procédé expérimental et des gestes nécessaires, le tout dans l'obscurité quasi complète.

5. L’actinomètre électrochimique.

5.1.La fabrication de l’appareil

Afin de pouvoir reproduire les expériences réalisées par Edmond Becquerel à l'aide de l'actinomètre électrochimique nous avons construit une boîte en bois de chêne, ajustée de la même manière que la boîte précédente, à l'aide d'un système de tenons et de mortaises.

La boîte était équipée de deux volets coulissant sur le dessus, de la même manière que la précédente, permettant d'introduire les plaques de chacun des

compartiments. Mais elle était aussi équipée d'un système de double volet sur le devant permettant d'agir sur une lucarne en verre ajustée dans le bois. Un premier volet permettait d'accéder à l'ensemble de la vitre afin de la nettoyer. Celui-ci était équipé d'une ouverture en son centre de 2 cm de large sur 5 cm de long. Un deuxième volet coulissant sur le premier, permettait d'ouvrir ou de fermer à volonté cette ouverture.

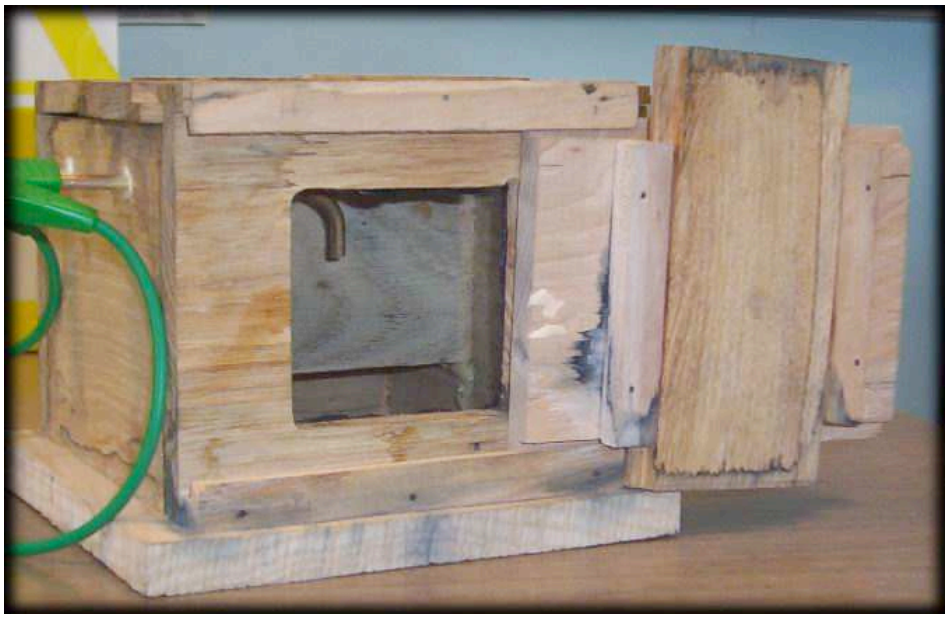


Fig 6 : 1ière cuve de l'actinomètre, premier volet coulissant, et lucarne

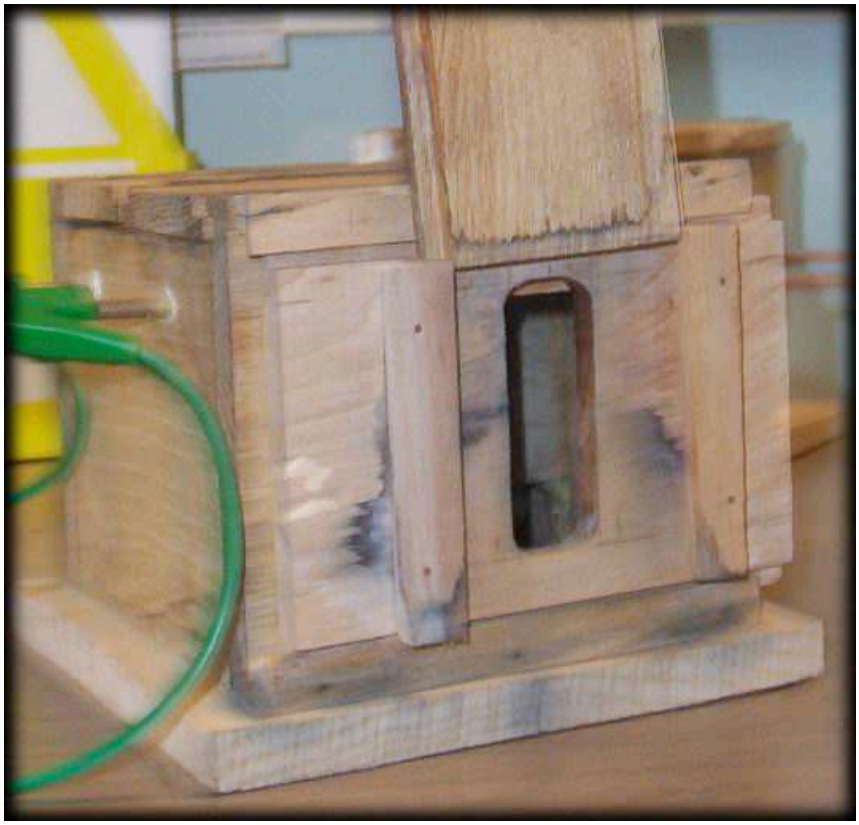


Fig 7 : 1ière cuve de l'actinomètre, second volet coulissant, et fente.

Les plaques que nous utilisions étaient fixées verticalement à l'intérieur de celle-ci. L'une placée dans le compartiment arrière de la boîte restait en permanence dans l'obscurité. L'autre, placé juste derrière le volet, recevait la lumière lorsque ce dernier était ouvert. Ce système permettait d'éclairer une seule des deux plaques à volonté, et d'ouvrir et refermer très rapidement le volet afin d'exposer la substance à la lumière pendant un temps minimum.

Fig 8 : 1ière cuve de l'actinomètre, plaque fixée destinée à recevoir la lumière

Dès la première utilisation de cette boîte un problème est survenu. Comme précédemment le bois gonflait. Mais cette fois, la face avant de la boîte étant perforée, afin d'y ajuster la vitre, et celle-ci étant beaucoup plus fine que le bois, le fil du bois était en contact direct avec le liquide. La face avant de la boîte s'est alors gorgée d'eau, et a gorgé d'eau les volets permettant la fermeture de celle-ci.

Le bois gonflant, le volet d'obturation coulissait beaucoup moins bien que lorsqu'il était sec. La résistance qu'il présentait lors de l'ouverture et de la fermeture provoquait des mouvements de la boîte, et une agitation du liquide intérieur.

Un phénomène tout à fait particulier en découlait : un courant électrique provoqué par l'agitation du liquide, probablement dû au mouvement de celui-ci à proximité des plaques, apparaissait. Ce courant était du même ordre de grandeur, sinon

plus, que le courant provoqué par la réaction photosensible. Lorsque l'on ouvrait et fermait le volet un courant très important, irrégulier puisque dépendant de l'importance de l'agitation provoquée, rendait les mesures totalement impossibles.

Il est peu probable qu'Edmond Becquerel n'ait pas observé un tel phénomène, d'une telle amplitude. En effet, dans l'obscurité la plus complète, avec des plaques justes préparées, très sensibles, un simple coup contre la table sur laquelle repose la cuve fait apparaître ce courant. Pourtant dans ses publications décrivant l'actinomètre électrochimique et son utilisation, à aucun moment Edmond Becquerel ne fait mention de ce phénomène. Cela nous a dans un premier temps déstabilisé, et nous a incité à nous replonger dans l'ensemble de la bibliographie de cet auteur afin de rechercher quelle spécificité expérimentale nous avions omis de respecter.

C'est lors de la vérification de cette bibliographie que nous avons consulté un mémoire d'Edmond Becquerel, lu à l'Académie des sciences le 25 juin 1855, intitulé «*recherche sur les effets électriques produits au contact des solides et des liquides en mouvement*[84] ». Il introduit ce mémoire en disant que dans une série de recherches entreprises une quinzaine d'années plus tôt il avait déjà observé ce phénomène. Il y décrit ensuite des procédés et des appareils qu'il construit afin de produire le courant en faisant tourner des roues dans des liquides. Il propose ce moyen pour construire des générateurs, mais ne poursuivra apparemment pas cette recherche.

Ceci nous conduit à penser que lui aussi avait observé cet artefact, lors de l'utilisation de l'actinomètre. Plutôt que d'en faire mention dans ses publications, à une époque où ses recherches portaient sur un tout autre domaine, il avait probablement préféré garder cette découverte pour lui, envisageant de l'étudier plus tard.

Mais Edmond Becquerel parvient pourtant à réaliser ces expériences. Il nous fallait donc trouver comment éviter ce phénomène. Dans son ouvrage intitulé *« La lumière : ses causes, ses effets*[85] » qu'il publie en 1867, nous avons pu nous apercevoir que la description de l'actinomètre électrochimique est considérablement différente. Il dit cette fois utiliser une cuve en verre, noircie extérieurement, sur le devant de laquelle coulisse un écran. Ce procédé permet de s'assurer, en utilisant simplement de la graisse, que le liquide ne viendra pas perturber l'ajustement des volets obturateurs.

---

[84] Becquerel, E. (1855). "Recherches sur les effets électriques produits au contact des solides et des liquides en mouvement." Annales de physique et de chimie **44**: 401-451.

[85] Becquerel, E. (1868). La lumière, ses causes, ses effets. Paris, Firmin Didot Frères, fils et cie.

Fig 9 : 2ième cuve de l'actinomètre en plexiglas et verre, volet coulissant

Ne disposant pas de cuve en verre de dimension adaptée nous avons choisi d'utiliser, pour fabriquer cette nouvelle boîte, une cuve en plexiglas cylindrique, que nous avons peinte en noir extérieurement à l'aide de trois couches d'une peinture extrêmement opaque.

Nous avons adapté à l'intérieur une cloison permettant de la séparer en deux compartiments mais laissant passer, au fond de la cuve, le liquide. Nous avons équipé cette boîte à l'avant d'une fenêtre en verre de 2 cm de large sur 5 cm de long, que l'on pouvait masquer à l'aide d'un volet coulissant. Lorsqu'elle était parfaitement fermée, cette boîte était complètement opaque. L'ajustement du volet était tel qu'il coulissait sans le moindre effort, et sans provoquer le moindre mouvement de la boîte. La différence de matériau est sans effet, puisque la lumière traverse, comme dans l'expérience de Becquerel, une couche de verre avant d'agir sur la substance. Nous avons placé cette boîte, comme dans l'expérience précédente, sur un plateau élévateur équipé de crémaillères.

5.2.La mise en place de l'expérimentation.

Fig 10 : fente réglable utilisée lors de la réplication

Fig 11 : lentille utilisée lors de la réplication

Le montage permettant l'expérimentation est sensiblement le même que précédemment. Cette fois la lumière devant pénétrer par l'avant de la boîte, le spectre devait être horizontal. Nous avons donc positionné le prisme horizontalement. La cuve de l'actinomètre est placée dans la direction de la lumière réfractée. Afin d'obtenir un spectre d'une grande netteté, nous avons utilisé une lentille de grande focale, placée derrière le prisme.

A la suite de cette lentille nous avons placé une fente réglable permettant de sélectionner des portions de spectre très fines. Le montage était ainsi au plus proche de celui que décrit Edmond Becquerel.

5.3.La réalisation des expériences

Il nous fallait, pour reproduire ces expériences, obtenir un spectre d'une très grande netteté et d'une très grande finesse, afin de pouvoir y observer les raies de Fraunhofer. Le spectre que nous avons obtenu mesurait environ 80 cm de long sur 20 cm de large. Malgré l'utilisation d'une lentille de grande focale, et l'ajout d'une fente très fine à l'entrée de la chambre noire, qui ne laissait entrer qu'un rai de lumière très fin, nous n'avons pas pu observer les raies de Fraunhofer dans le spectre qui se formait sur l'écran blanc que nous placions juste devant la cuve de l'actinomètre électrochimique afin d'effectuer les réglages. Lorsque la fente était trop mince, le spectre obtenu n'était pas assez lumineux pour les y discerner, lorsque la fente était plus large, plusieurs spectres se superposant, les raies n'étaient plus apparentes.

Dans ces conditions, il était probable que nous ne parviendrions pas à identifier les raies de Fraunhofer à l'aide de l'actinomètre électrochimique, puisque nous ne les identifiions déjà pas à l'œil nu. Malgré cela nous avons poursuivi la série d'expériences débutées.

Edmond Becquerel utilise en 1841 dans son actinomètre électrochimique des plaques d'argent recouverte d'iodure d'argent, mais dans les publications dans lesquelles il décrira cet appareil plus tard, il parlera successivement de plaques d'argent couvertes de bromure d'argent, et de chlorure d'argent. Nous avons donc souhaité tester l'appareil avec ces trois substances. L'iodure et le bromure d'argent sont préparés de la même manière que précédemment. Le chlorure d'argent est préparé de deux manières, suivant les publications que l'on consulte. La première, que nous avons employée précédemment, consiste à recouvrir la plaque de chlorure d'argent que l'on fait sécher à l'aide de la flamme d'une lampe à alcool. Cette technique, qu'Edmond Becquerel appelle un recuit, permet de mesurer les effets dans des zones spectrales différentes de l'autre technique. Celle-ci consiste à plonger successivement les deux plaques d'argent dans une solution de dichlorure de cuivre, en les reliant à la borne positive d'un générateur de courant continu. L'autre électrode est une plaque de platine. Cette opération ne doit durer que quelques secondes, afin que la surface de l'argent se couvre d'une fine couche de chlorure d'argent. La différence principale, hormis le fait que l'on ne pratique pas de recuit, réside dans le fait que la plaque est entièrement couverte, sur ses deux faces, de chlorure d'argent. On peut ainsi poursuivre les expérimentations même quand la couche de substance ne réagit plus, en retournant simplement la plaque exposée à la lumière. Nous avons donc réalisé quatre séries d'expériences à l'aide du montage que nous avons décrit.

Le spectre qu'Edmond Becquerel emploie mesure lui aussi environ 80 cm de long. Afin d'y mesurer des raies de Fraunhofer il faut que la fente placée juste devant l'actinomètre présente une ouverture de quelques centièmes de millimètre, un dixième de millimètre maximum pour les raies les plus grosses. Lorsque nous avons utilisé une ouverture de cette largeur pour envoyer de la lumière à l'intérieur de la cuve, nous n'avons mesuré aucun effet. Il est probable que la lumière provoquait une réaction, mais d'une intensité tellement faible, que le galvanomètre, positionné sur le même calibre que pour l'ensemble des expériences précédentes, n'accusait aucun courant. Nous avons alors décidé de descendre dans les calibres de notre galvanomètre afin de rechercher si un effet se produisait. Sur le calibre 25 microampère nous avons effectivement pu voir que la lumière semblait provoquer un effet que le galvanomètre mesurait, présentant une déviation de quatre à cinq graduations. Mais positionnée sur ce calibre, la sensibilité était telle que la moindre vibration du liquide, provoquée simplement par nos pas sur le sol, générait des courants d'une intensité bien plus grande. Nous nous retrouvions donc dans la situation précédente, rendant impossible la moindre mesure. De plus Edmond Becquerel ne disposait pas d'un système permettant de multiplier la sensibilité de son galvanomètre par 20. Cette investigation n'était qu'un test, inexploitable pour la réplication.

Il est possible que le manque de lumière soit dû au fait que la fente que nous utilisions ne faisait qu'1 cm de hauteur. Si Edmond Becquerel utilisait une fente plus haute, plus de lumière pouvant la traverser, les effets produits par celle-ci étaient peut-être alors mesurables. Cependant, il est extrêmement difficile d'obtenir un spectre parfaitement droit, dont les raies seraient parfaitement rectilignes, et parfaitement verticales. Ce serait pourtant la seule possibilité qui permettrait d'exploiter, à l'aide de la fente, la totalité de la hauteur de ce spectre. La seule information que nous ayons concernant la fente qu'il emploie date de 1851, où il décrit une fente de 4 cm de hauteur. Il ne nous est pas possible d'imaginer si cette simple différence permet de rendre mesurables les effets. De plus, il est possible qu'une fente si fine provoque un phénomène de diffraction, qui rende impossibles les mesures recherchées.

Nous avons alors décidé de réaliser les expériences en ouvrant la fente jusqu'à obtenir des effets mesurables. Nous étions conscients qu'il nous serait alors impossible d'observer les raies de Fraunhofer. Nous sommes parvenus à réaliser 12 mesures régulièrement réparties dans le spectre. Il nous a été impossible d'en réaliser plus. Nous avons pu, par contre, cette fois, grâce à l'étalement du spectre, réaliser deux mesures au-delà du violet pour chaque substance.

Il est difficile d'expliquer cette énorme différence dans la finesse des mesures entre le travail d'Edmond Becquerel et le nôtre. Mais il faut simplement rappeler qu'alors que nous avons manipulé environ trois mois, Edmond Becquerel a reproduit ces expériences sur plus de quatre ans. La maîtrise qu'il devait avoir de ses procédés et de ses appareils était probablement considérablement supérieure à la nôtre. Il est possible, de plus, que certains éléments du montage qu'il utilisait n'aient pas été décrits ou présentés dans ses publications. Nous n'avons pas trouvé de procédé permettant de modifier celui-ci afin de rendre possibles ces mesures.

Nous présentons dans le tableau suivant les résultats obtenus pour les différentes substances étudiées. Nous avons réalisé chaque série d'expériences quatre fois, en obtenant des résultats sensiblement identiques. Nous présenterons donc les résultats d'une seule de chacune de ces séries.

Chaque zone du spectre pour laquelle nous avons fait des mesures est espacée de la précédente de 10 cm, pour une longueur totale du spectre visible de 76 cm.

Couleur	Bromure d'argent	Chlorure d'argent recuit	Chlorure d'argent	Iodure d'argent
Rouge sombre	3	3	4	1
Rouge	7	5	6	4
Orange	7	7	3	5
Jaune orangé	6	6	4	11
Jaune	7	7	4	12
Vert	9	9	4	10
Bleu	11	4	7	8
Violet	14	4	8	14
Violet sombre	14	3	7	8
UV proches	18	1	8	8
UV lointains	6	0	4	4

Tableau 5 : Mesures obtenues lors de la réplication de l'actinomètre électrochimique, avec des plaques d'argent recouvertes toutes deux d'halogénures d'argent.

Nous pouvons observer, d'après ces résultats, que le chlorure d'argent lorsqu'il est recuit présente une sensibilité différente du chlorure d'argent préparé par électrolyse. Il est plus sensible dans le jaune et le vert, il crée donc des courants plus intenses, alors que le

chlorure d'argent non recuit présente une sensibilité plus importante dans le violet. C'est un résultat qu'avait obtenu Edmond Becquerel.

Nous pouvons de plus noter que le bromure d'argent, comme nous l'avions déjà observé auparavant, crée des courants plus importants lorsqu'il réagit sous l'effet de la lumière. Il présente une sensibilité maximum pour le violet et les ultraviolets proches. Nous notons que, à part le chlorure d'argent recuit, toutes les substances présentent une sensibilité dans les ultraviolets. Mais cette sensibilité s'atténue très rapidement lorsque l'on s'éloigne dans les ultraviolets, alors qu'Edmond Becquerel signale avoir observé des effets sur une longueur égale à la longueur du spectre visible, au-delà du violet. Nous ne pouvons expliquer cette différence qu'en mettant en cause la finesse et la précision de nos mesures par rapport à celles d'Edmond Becquerel.

Conclusion :

Notre activité de réplication a été émaillée de difficultés et d'échecs qui ont rendu souvent difficile, et parfois même impossible, l'expérimentation. La plupart des problèmes que nous avons rencontrés n'ont pas été explicités par Edmond Becquerel. Ils nous ont imposé des modifications sur les appareils et les montages, des adaptations. Nous avons même dû plusieurs fois reconstruire les appareils en prenant en compte les difficultés rencontrées. Certaines des expériences que nous avons souhaité mener ont abouti à un échec. Mais si ces échecs concernent l'obtention des résultats, ils nous apportent souvent des informations importantes concernant le fonctionnement des appareils, et leurs utilisations.

Nous n'avons pas pu reproduire les expériences d'analyse de la lumière au moyen des plaques daguerréotypes. Le manque de moyens mis à notre disposition ne nous le permettait pas. L'impossibilité dans laquelle nous nous sommes trouvés de produire un spectre suffisamment net pour observer les raies de Fraunhofer ne nous aurait quoi qu'il en soit pas permis de les réussir.

Les réplications que nous avons mises en œuvre nous ont permis d'aboutir à plusieurs conclusions. Les spécificités dans la réalisation des cuves en bois, et en particulier les problèmes que nous avons rencontrés concernant les tanins du chêne, nous conduisent à penser qu'Edmond Becquerel n'a pas réalisé seul ses appareils. En effet il semble que le fait que ces boîtes soient noircies intérieurement permette d'éviter la présence de ces tanins dans le liquide, phénomène qu'il ne décrit pas. Il est possible qu'à l'époque le simple fait de dire que la boîte en bois est noircie permette au lecteur de comprendre le motif de cette opération.

Mais l'importance des perturbations provoquées sur le liquide semble suffisamment considérable pour qu'Edmond Becquerel ait jugé nécessaire de l'expliciter s'il les avait rencontrées lui-même. Ceci nous amène à penser qu'il a confié la réalisation de ces appareils à un professionnel. Nous n'avons pas de trace de ces opérations dans les cahiers d'acquisition de l'époque pour le laboratoire de physique appliquée, conservés au Muséum national d'histoire naturelle. Mais ceux que nous avons pu consulter mettent en évidence l'étroite collaboration entre César Becquerel et le fabricant d'instruments Chevalier. Le projet d'échange qu'il envoie au ministère de l'instruction publique en 1845[86], visant à échanger avec Chevalier des instruments de mécanique qu'il juge inutiles dans son laboratoire contre des instruments d'optique, semble montrer que ces deux hommes entretiennent des relations professionnelles étroites. Si Edmond Becquerel a soumis la construction de ses appareils à un professionnel, c'est probablement à Chevalier qu'il s'est adressé.

La réplication de ces expériences nous a aussi permis de mettre en évidence la précision et la finesse nécessaire à la réussite de celle-ci. Pour parvenir aux résultats qu'il a obtenus, Edmond Becquerel devait maîtriser l'usage de ses appareils et le travail en chambre obscure. Plusieurs des expériences qu'il dit avoir réussies sont restées pour nous inaccessibles. Il nous a fallu reconstruire les gestes et des habitudes de l'époque, sans en avoir aucune trace écrite. C'est par tâtonnements que nous avons pu approcher ces techniques. Il est probable que la courte période durant laquelle nous avons réalisé nos expériences ne nous a pas permis d'accéder à l'ensemble des éléments implicites nécessaires à la bonne réussite de toutes les expériences de Becquerel. Une grande partie des données pratiques se transmet probablement oralement, par la formation expérimentale. La technique de la chambre noire n'étant quasiment plus employée actuellement, nous n'avons pu accéder à ces connaissances qu'en essayant de reproduire les expériences. L'incapacité dans laquelle nous avons été de reproduire les dernières expériences d'Edmond Becquerel à l'aide de l'actinomètre, et surtout l'énorme différence de précision entre ces manipulations et celles que nous avons réussi à mettre en œuvre semblent mettre en évidence la finesse des travaux qu'il a réalisés.

L'apparition d'un artefact important dû au mouvement du liquide, dont Becquerel ne fait mention qu'en 1855, alors qu'il dit l'avoir rencontré lors de ces recherches 15 ans plus tôt, nous a permis de faire apparaître une cohérence entre les différentes activités qui l'occupent. Alors qu'il ne semble y avoir aucun rapport entre ses recherches sur la lumière et ses

[86] Becquerel, A. C. (1845). Echange d'instruments de physique: dossier AM612, Archives du muséum national d'histoire naturelle.

recherches sur les courants provoqués par le mouvement des liquides, la réplication de ces expériences nous a permis d'identifier à quel moment, et dans quelles conditions il a découvert ces effets. Une autre partie de son travail, qu'il mène dès 1840 aux côtés de Cahours, concerne les pouvoirs réfringents des liquides[87]. Nous ne traiterons pas en détail le contenu de cette publication dans laquelle il étudie la réfraction d'une trentaine de liquides différents. Il apparaît cependant que cette étude est directement liée à son travail sur les deux premiers appareils. En effet la lumière traversant à chaque fois une couche de liquide avant d'agir sur les plaques métalliques, connaître les effets de ce liquide sur la lumière semble indispensable. La réplication de ces expériences nous a donc permis de faire apparaître un lien qui parfois semblait ne pas exister entre plusieurs domaines de recherche dans lesquelles a travaillé Edmond Becquerel.

Les procédés de préparation des plaques recouvertes de substances photosensibles, lorsqu'ils sont décrits dans les publications, semblent très proches des procédés de préparation des plaques daguerréotypes. C'est en préparant ces plaques afin de les introduire dans l'appareil à deux compartiments ou dans l'actinomètre électrochimique que l'on se rend le mieux compte de la proximité de ces procédés. Les gestes, l'organisation de la paillasse de préparation, les temps d'attente, sont très proches de ceux que nous avons mis en œuvre lorsque nous avons, il y a quelques années, tenter la réalisation de daguerréotypes. Nous avons réalisé ceux-ci après notre mémoire de DEA traitant de l'histoire de la photographie. Ceci n'avait comme objectif que de satisfaire une curiosité et un intérêt personnel. Nous avons utilisé pour cela un appareil de la fin du XIXème siècle. Les plaques étaient en cuivre, recouverte d'une couche d'argent par un procédé électrochimique. Les images que nous avons obtenues sont très nettes et très fines.

Il est très difficile d'expliquer la sensation que nous avons eue de proximité entre ces procédés. Elle relève d'une impression d'habitude dans les gestes, et dans l'organisation du matériel. La reproduction de ces expériences nous a convaincu que l'hypothèse que nous proposions concernant l'origine photographique des procédés employés par Becquerel était vraisemblable. Ce point est pour nous, en plus des éléments textuels la confirmant, le principal argument validant notre hypothèse. C'est malheureusement le plus difficile à expliciter, puisqu'il relève d'habitudes gestuelles et manipulatoires que l'on peut difficilement décrire.

[87] Becquerel, E. and A. Cahours (1840). "Recherche sur les pouvoirs réfringents des liquides." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **11**: 867-872.

Cette difficulté à décrire des pratiques et des gestes que nous rencontrons ici est probablement la même qu'a rencontrée Becquerel lors de la rédaction de ses mémoires, omettant certaines informations, et qui nous a conduit à établir un grand nombre d'hypothèses sur sa manière de manipuler et d'expérimenter. C'est probablement aussi cette difficulté qui explique que la disparition de l'utilisation de la chambre noire dans la pratique des physiciens se soit accompagnée d'une perte totale des informations concernant la manière de l'utiliser.

Quatrième partie :

Quatrième partie : Analyse du contenu théorique des recherches de Becquerel

Quatrième partie : Analyse du contenu théorique des recherches de Becquerel

Nous allons dans cette partie étudier le contenu théorique présent dans les recherches d'Edmond Becquerel. Nous présenterons les éléments de théorie qu'il utilise pour réaliser ses recherches, ainsi que les implications théoriques de celles-ci. Le contenu de ses publications mentionne très rarement des éléments permettant d'identifier un contexte théorique particulier. Les trois domaines que nous présentons ici, concernant ses conceptions de l'électricité, de la réaction chimique, et de la nature de la lumière, ne sont pas abordables directement par des exposés explicites faits par l'auteur de ces publications.

Le peu d'informations que nous pouvons extraire concernant les conceptions d'Edmond Becquerel sur l'électricité se trouve dans la description des expériences qu'il réalise. En effet, afin de préciser la manière dont se déroulent celles-ci, il est conduit à donner des détails qui peuvent permettre de comprendre sa perception de ces phénomènes. Lors des descriptions de ses résultats expérimentaux, il est amené à décrire le comportement du galvanomètre, et des plaques auxquelles il est relié. C'est dans ces descriptions qu'apparaissent des éléments permettant d'étudier sa conception de l'électricité. Cependant, celles-ci n'étant jamais développées, puisqu'il fait référence la plupart du temps aux travaux de son père pour justifier de son analyse, il sera très difficile de connaître en détail son point de vue.

L'approche théorique qu'il développe concernant la réaction chimique est, elle aussi, extrêmement obscure. Jamais il ne décrit de procédés d'analyse permettant d'étudier les produits des réactions qu'il emploie. Il ne donne que très rarement les formules chimiques des substances utilisées, employant de préférence, comme c'est l'habitude à l'époque, les noms courants de celles-ci. Le seul moment où il décrit une réaction chimique est celui où il présente, dans sa première publication, l'appareil à deux phases. Mais la forme de sa présentation met en évidence que son analyse reste à l'état d'hypothèse. Ses conceptions concernant l'action chimique sont donc, elles aussi, très difficiles à cerner.

L'un des éléments centraux de l'analyse des résultats produits par ces différents appareils, concerne la nature de la lumière. De la même manière qu'auparavant, Edmond Becquerel ne s'engage pas dans le débat concernant celle-ci. À un seul moment il prendra position, basant sa réflexion sur les résultats de ses expériences. Mais concernant ce point de théorie, nous disposons d'un outil, qui n'existe pas pour les autres domaines, nous permettant d'aborder plus précisément cette question. C'est en effet sur ce sujet que se déroule la controverse qui l'oppose à Jean-Baptiste Biot. Si l'on ne dispose pas dans les textes d'Edmond

Becquerel de suffisamment d'éléments pour qualifier sa conception de la nature de la lumière, la manière dont réagit Jean-Baptiste Biot, et les arguments qu'il apporte pour s'opposer aux travaux d'Edmond Becquerel, permettent d'étudier cette question sous un angle différent. C'est donc par une analyse de type négatif-positif que nous pourrons identifier des éléments permettant de comprendre cette conception. En analysant les raisons qui poussent Biot à rejeter, ou du moins à critiquer, les travaux d'Edmond Becquerel, nous pensons pouvoir comprendre ce qu'impliquent ceux-ci.

1. Une théorie de l'électricité ?

Il est très difficile de percevoir les conceptions d'Edmond Becquerel concernant l'électricité dans ses publications traitant de la nature de la lumière. Il se contente d'exprimer des observations sur les effets électriques produits par la lumière sur la matière, sans débattre de la nature de ses effets électriques. On peut observer que si des réactions se produisent au sein de la communauté scientifique, à la suite de ces publications, concernant les interprétations qu'elles impliquent sur la nature de la lumière, aucune réaction ne se produit en ce qui concerne les considérations sur l'électricité qui y sont développées. Il semble donc que la manière dont Edmond Becquerel conçoit l'électricité, et à laquelle il se réfère dans son travail, soit communément admise par la communauté de son époque.

On trouve dans ses textes, des expressions telles que « *le perchlorure de fer prend l'électricité positive, et l'alcool la négative*[88] », et « *la lame a pris au liquide l'électricité négative*[89] ». Ce type d'observation est basé sur le sens de déviation de l'aiguille du galvanomètre. En effet Edmond Becquerel connecte son appareil de mesure aux deux plaques dans le but de mesurer une déviation de son aiguille. Celle-ci étant en position minimum lorsque l'appareil est débranché, les mesures qu'il effectue sont toujours dans le sens positif. Il inverse donc le sens des branchements, lorsque l'aiguille est chassée du mauvais coté. C'est en fonction de ce branchement qu'il détermine quelle plaque « *possède l'électricité positive* », et quelle plaque « *possède l'électricité négative* ».

[88] Becquerel, E. (1839). "Recherche sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques." Ibid. **9**: 145-149.

[89] Becquerel, E. (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 561-567.

Il est difficile de déterminer si ce qu'il nomme électricité positive et négative désigne une simple polarisation provoquée par la présence d'un seul fluide, deux états différents d'un même fluide l'un positif l'autre négatif, ou de deux fluides complètement distincts. Le fait de considérer qu'une plaque « *prenne l'électricité* […] *au liquide* » peut permettre de considérer que l'électricité est composée de deux éléments distincts, qui peuvent être séparés, et accumulés. Une plaque de platine par exemple peut prélever à un liquide, qui contient les deux électricités, une partie de l'électricité positive, l'autre plaque prélevant une partie de l'électricité négative. Les deux plaques sont alors chargées différemment, et le courant circule.

Le travail d'Edmond Becquerel est essentiellement expérimental. Il n'a pas pour vocation d'expliquer les phénomènes obtenus, mais de les décrire. Il n'y a donc aucun détail sur la nature qu'il prête à l'électricité. Lorsqu'il doit faire référence à des éléments de théorie, il fait appel aux travaux de son père sur le sujet. Comme nous l'avons déjà dit, la manière dont il décrit l'électricité, ou les électricités, n'éveille aucune réaction visible dans les comptes rendus de l'Académie des sciences, de la part de ses contemporains. Les références qu'il fait aux travaux de son père n'en éveillent pas plus.

Afin de comprendre plus précisément comment Edmond Becquerel, ainsi que son père, comprennent le phénomène électrique, nous avons dû consulter d'autres ouvrages des mêmes auteurs. Il nous fallait des ouvrages présentant un minimum d'éléments de théorie, et traitant d'électricité. Le seul qui nous permette d'aborder ces questions est le « *traité d'électricité et de magnétisme*[90] » qu'ils publient en collaboration en 1855. Bien que cet ouvrage paraisse une quinzaine d'années après les travaux étudiés, la description qui est donnée de la nature de l'électricité semble parfaitement correspondre à l'usage qu'en fait Edmond Becquerel dès 1839. Les conceptions qu'ils développent alors sur le sujet semblent ne pas avoir réellement évolué durant ces quinze années. Dans l'introduction de ce traité les auteurs écrivent :

« O*n est conduit à distinguer deux états électriques dans les corps, et par suite deux espèces d'électricité : l'électricité vitrée et l'électricité résineuse. À ces dénominations on a substitué celles d'électricité positive et d'électricité négative, qui sont généralement adoptées, indépendamment de toute explication théorique sur l'origine de l'électricité. Ces deux électricités sont représentés par les signes algébriques + et -, comme il suit :*

+ électricité positive (vitrée),

- électricité négative (résineuse).

[90] Becquerel, A.-C. and E. Becquerel (1855). Traité d'électricité et de magnétisme: et des applications de ces sciences à la chimie, à la physiologie et aux arts. Paris, Firmin-Didot frères.

Il est facile de démontrer que les électricités de même nom se repoussent, et que celle de noms contraires s'attirent ».

La conception dans laquelle se placent les deux hommes en 1855, qui correspond probablement à celle dans laquelle ils sont placés en 1839, est donc celle de l'électricité vitrée et résineuse. Les termes positifs et négatifs remplacent simplement celle-ci. Mais cet extrait ne précise pas si ces deux électricités sont deux états du même fluide, ou des fluides différents. Ils indiquent d'ailleurs que cette considération est indépendante de toute explication théorique. Il est probable que ces expressions d'électricité positive et d'électricité négative soient donc partagées par l'ensemble des membres de la communauté, quelles que soient les positions théoriques dans lesquelles ils se trouvent.

Si nous ne pouvons toujours pas qualifier précisément comment Edmond Becquerel perçoit le phénomène électrique, cet extrait nous permet en tout cas de comprendre pourquoi aucune réaction ne se manifeste sur ce sujet à la suite de ses publications. Les expressions qu'il emploie, et la manière dont il les utilise, dans le seul but de décrire un procédé expérimental et sans prendre position, sont totalement neutres par rapport à un débat qui pourrait avoir lieu sur la nature de l'électricité. Il ne s'implique pas, ou cherche à ne heurter personne. C'est exactement la même démarche qu'il adoptera pendant plusieurs années concernant la nature de la lumière. Mais les travaux de Becquerel étudiés ici semblent ne pas avoir d'impact sur une quelconque explication du phénomène électrique. Ils en ont probablement plus sur celui de la lumière, ce qui conduit certains chercheurs à réagir, alors que Becquerel semble rechercher la neutralité. La question centrale est alors de savoir s'il est possible, en se bornant à un travail expérimental, d'atteindre une neutralité théorique complète. Cette question sera débattue dans la dernière partie de ce travail.

Ce point est élucidé dans l'introduction du traité de 1855 dans un paragraphe intitulé « *hypothèses sur l'origine de l'électricité* ». Les deux auteurs y déclarent :

« *Pour expliquer les différents phénomènes résultant des attractions et répulsions électriques, on a émis diverses hypothèses, dont aucune à elle seule ne représente l'ensemble de tous les phénomènes. L'hypothèse d'un seul fluide consiste à admettre que l'électricité est un fluide impondérable répandu dans tous les corps et constituant leur état naturel. Lorsqu'il est accumulé ou dilaté dans un corps, il en résulte un excès ou un manque de fluide qui donnent lieu à des états électriques différents. L'hypothèse de deux fluides suppose l'existence de deux fluides impondérables pour les deux propriétés contraires et dont la réunion constitue le fluide naturel. Développer l'électricité, dans cette hypothèse, c'est opérer la séparation des*

deux fluides, tandis que, dans la première, c'est troubler l'équilibre du fluide électrique, lequel devient en excès d'un côté et en défaut de l'autre. Mais dans l'une comme dans l'autre supposition, on admet que les corps renferment une immense quantité de fluide naturel, et que l'on ne peut atteindre la limite de la décomposition ou de l'accumulation dans l'acte de l'électrisation qu'en désunissant les molécules, c'est-à-dire en détruisant la force d'agrégation. On doit ajouter que l'on attribue les attractions et les répulsions aux actions des électricités entre elles, et non à l'action de l'électricité sur les molécules des corps.

Indépendamment de ces hypothèses fondées sur l'existence d'un ou de deux fluides, on a émis l'opinion que les effets électriques pourraient bien résulter de mouvements vibratoires excités dans un milieu pénétrant tous les corps, répandu dans tout l'univers, et qui a reçu le nom d'éther.

Mais jusqu'ici on n'a pas lié encore l'ensemble des phénomènes électriques en partant d'une de ces hypothèses ; aussi nous nous bornerons à appeler électricité la cause de tous ces effets ; électricité naturelle, celle qui existe dans les corps ; électricités positive et négative, les états opposés dans lesquels se trouvent les corps, sans spécifier s'ils doivent ces états à l'action d'un ou de deux fluides ou à un mouvement vibratoire existant dans un milieu qui les pénètre. »

Si cet extrait est long, il a l'avantage de décrire précisément le débat en cours à l'époque, et de bien situer la prise de position d'Edmond et de César Becquerel concernant la nature de l'électricité. Ils connaissent les différentes théories qui s'y rapportent, mais considèrent qu'aucune n'est pleinement satisfaisante, dans la mesure où aucune n'explique la totalité des effets observés. Ils choisissent donc officiellement et explicitement de ne pas prendre position, de n'utiliser aucune des théories en question à l'époque, et se contentent de considérer l'électricité comme la cause des effets qu'ils étudient, sans lui attribuer d'origine nécessitant un choix théorique. Leur ouvrage concerne le phénomène électrique étudié à travers les effets qu'il produit, et ne nécessite pas de prise de position.

On retrouve ici l'une des spécificités de la démarche de César Becquerel, à laquelle il a formé son fils. Le plus important dans la recherche sur la nature est, pour lui, de rester attaché aux faits, et de n'avoir recours à la théorie que lorsque c'est absolument indispensable. Il considère ici qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un positionnement théorique concernant la nature de l'électricité puisque ce qui en permet l'étude sont les effets qu'elle produit. C'est probablement dans la même démarche qu'est Edmond Becquerel lorsqu'il réalise ses recherches sur la nature de la lumière. Il n'est pas nécessaire dans ses travaux de faire un

choix théorique sur l'électricité. Pour en décrire les effets, il lui suffit d'utiliser des concepts, telles qu'électricités positives et négatives, transversaux à la plupart des modèles théoriques débattus. Il est en cela fidèle aux enseignements de son père.

De la même manière, il emploiera des concepts transversaux concernant la nature de la lumière, puisque ce qui le concerne ce sont les effets et non, du moins au départ, « la cause de ces effets ». Mais les implications de ses travaux concernant la nature de la lumière rendront inefficaces, dans ce cas-là, le choix de la neutralité.

Ce refus de s'engager, cette absence de prise de position, concernant la plupart des éléments explicatifs de son travail qui pourraient nécessiter des considérations théoriques, ne peut donc pas être considéré comme de la frilosité, ou un moyen de se protéger. Il relève plutôt d'une démarche d'investigation scientifique particulière, enseignée par son père, en opposition à celle développée au sein de la société d'Arcueil au début du XIXe siècle par Laplace et ses disciples. En réaction à une volonté affichée de mathématisation et de théorisation, qui atteint ses limites à l'époque[91], César Becquerel prône l'attachement au fait expérimental, et le recours minimum à toute forme de théorie. Jean-Baptiste Biot est membre de la société d'Arcueil.

2. Une théorie de la réaction chimique ?

La question d'une conception théorique de la réaction chimique, qui pourrait être abordée par les travaux de Becquerel est encore plus obscure. Il est quasiment impossible de l'identifier, dans la mesure où elle n'est jamais abordée, même dans la description des résultats expérimentaux. Si la thèse que soutient Becquerel est qualifiée de « double thèse en physique et en chimie », la présence de cette dernière n'est reconnaissable que par l'exploitation de réactions chimiques sous l'effet de la lumière. Si les réactifs sont généralement précisés, les produits des réactions sont très rarement analysés. Aucune interprétation n'est donnée aux transformations subies par ces réactifs.

Lorsqu'il décrit la réaction du perchlorure de fer sur l'alcool il en décrit les produits, et déclare qu'« *en examinant le liquide, on trouve que le perchlorure de fer est passé à l'état des protochlorure*[92] ». Mais il ne donne aucune précision concernant les outils employés pour faire

[91] Fox, R. (1974). "The rise and fall of Laplacian physics." Historical studies in the physical sciences **4**: 89-136.

[92] Becquerel, E. (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 561-567.

cette analyse. Les descriptions qu'il donne des réactions sont essentiellement des descriptions visuelles concernant la formation d'un précipité, ou un changement de couleur.

Il semble que son père ait utilisé les moyens électrochimiques pour étudier les substances. C'est probablement ce même outil qu'il utilise lorsqu'il examine le produit d'une réaction. Mais à aucun moment il ne le signale. Il semble clair cependant qu'Edmond Becquerel est convaincu que lors des réactions chimiques qu'il étudie les parties des réactifs se séparent, et se recombinent entre elles, pour former de nouvelles substances. Il n'y a certainement pas, dans les conceptions d'Edmond Becquerel, apparition d'éléments qui n'ont pas été introduits dans le milieu, ou disparition d'éléments introduits. Les réactions chimiques sont une simple recombinaison des parties des réactifs. Il nomme ces parties « molécules », et considère que « *ces diverses réactions s'effectuent de molécule à molécule*[93] ».

Il faut entendre par ce terme « partie élémentaire ». Il ne s'agit pas ici du sens moderne de molécule. Il emploie, pour ce sens, le mot « composé ». Aucun des travaux de son père, ou des travaux qu'ils mènent ensemble, ne fait mention d'une quelconque théorie chimique de la réaction. Ils emploient les mots de décomposition, et de recombinaison, parlant de ces molécules, mais jamais ne s'expriment sur l'interprétation microscopique que l'on peut faire de ces réarrangements.

Il est probable qu'il faut voir de la même manière que précédemment un choix de ne pas prendre position pour l'une ou l'autre des théories chimiques de l'époque. À aucun moment Becquerel ne parle d'atome, ou d'équivalent. Ce qui l'intéresse concerne les proportions des différents éléments qui réagissent entre eux, caractériser théoriquement ces proportions n'apporterait rien de plus au contenu de ses travaux. Mais nous n'avons aucun élément de texte cette fois, permettant d'appuyer cette hypothèse. Ni César ni Edmond Becquerel ne s'intéresse directement à la chimie. Leurs ouvrages d'électricité traitent de substances chimiques et de réactions chimiques dans la mesure où elles sont liées à des phénomènes électrochimiques. Ils sont principalement physiciens, et ne s'expriment pas sur les théories chimiques, même pour, comme précédemment, dire qu'ils ne prendront pas position.

Nous ne disposons pas d'autres éléments permettant de compléter cette approche, puisque même les manuscrits que nous avons pu identifier, plus tardifs, n'apportent pas plus de précisions. Edmond Becquerel continue, en 1864, à utiliser le terme de « molécule » dans le même sens que précédemment.

[93] Ibid.

La cohérence, dans les travaux des Becquerel, et particulièrement dans ceux de César antérieurs aux recherches que nous étudions ici, apparaît dans le lien qu'ils construisent entre ces deux domaines, chimique et électrique. Le travail le plus considérable de César, qui lui vaut la plupart des récompenses et honneurs qu'il reçoit, concerne ses recherches en électrochimie. Il parvient dans ce domaine à établir des principes fondamentaux, et à introduire des procédures opératoires spécifiques. Il est intéressant d'observer que César met en œuvre des éléments d'une théorie électrochimique en refusant de s'inscrire dans un modèle théorique aussi bien dans le domaine de l'électricité que dans celui de la chimie.

3. Une théorie de la lumière ?[94]

Comme nous l'avons déjà dit, les publications d'Edmond Becquerel ne contiennent quasiment pas de considérations théoriques. Ses conceptions concernant la nature de la lumière sont donc extrêmement difficiles à aborder par la lecture de celles-ci. Mais contrairement aux théories étudiées précédemment, sur ce sujet, les réactions aux publications d'Edmond Becquerel sont vives, et répétées. C'est Jean-Baptiste Biot qui les formule, en répondant systématiquement aux communications de Becquerel dans les comptes rendus de l'Académie des sciences par des remarques, qui ont lieu soit lors de la même séance que la lecture du mémoire présenté, soit au plus tard lors de la séance suivante. On peut voir une chronologie de ses réactions dans le tableau synthétique des publications analysées présenté dans le deuxième chapitre. Nous considérons que le débat qui s'instaure entre Biot et Becquerel peut être considéré comme une controverse scientifique. Cette question est analysée en détail dans la dernière partie de ce travail.

Afin de présenter de manière détaillée cette controverse, nous devrons dans un premier temps situer le personnage de Jean-Baptiste Biot dans l'histoire de son époque, puis nous détaillerons de la manière la plus chronologique possible le déroulement de la controverse. Ceci nous permettra d'aborder la question du positionnement théorique d'Edmond Becquerel concernant la nature de la lumière.

[94] Cette question a fait l'objet d'une publication :
Fatet J., Viard J., « La naissance de la spectrométrie : L'actinomètre électrochimique d'Edmond Becquerel », Physis, rivista internazionale di storia della scienza, 41(1), p 167-182 .

3.1. Jean-Baptiste Biot, son œuvre et ses relations professionnelles

Jean-Baptiste Biot est en 1839 extrêmement connu, et reconnu pour ses nombreux travaux en physique et en optique. Il a produit une œuvre considérable traitant de la polarisation de la lumière et de sa nature corpusculaire[95]. En effet, digne héritier de Laplace et de ses considérations physiques du monde, il est membre de la société d'Arcueil, fondée par celui-ci, visant à la mathématisation et à la mécanisation de la physique. Ce courant de pensée dominera la physique française, et imposera ses méthodes d'investigation, pendant le premier quart du XIXe siècle. On peut considérer que vers le milieu des années 1820 l'école Laplacienne a perdu de son pouvoir[96]. Plusieurs de ses membres l'ont quittée, et ont rejeté ses positions dès le milieu des années 1810. Parmi ceux-ci se trouve François Arago, qui sera secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences à partir de 1835, et sera l'un des principaux promoteurs du procédé daguerréotype.

Jean-Baptiste Biot est un spécialiste de l'analyse de la lumière. Il travaille sur la polarisation en particulier, et la qualité de ses travaux est reconnue à l'époque tant du point de vue expérimental que théorique. Mais sa ferveur pour les théories newtoniennes le conduit à rejeter immédiatement et complètement les points de vue de Fresnel, qui considère que la lumière est de nature ondulatoire. Il poursuivra ses travaux, influencé par la théorie corpusculaire de la lumière, bien au-delà de la chute de la société d'Arcueil, et n'acceptera jamais la théorie ondulatoire. Même lorsqu'en 1849 Léon Foucault[97] réalise son expérience, considérée comme cruciale, permettant de montrer que la lumière se propage plus vite dans les milieux moins denses, il refusera d'accepter que la théorie corpusculaire de la lumière est invalidée.

Mais, bien avant l'expérience de Foucault, dès la fin des années 1820, la théorie ondulatoire de la lumière est acceptée par la grande majorité de la communauté scientifique. Seuls quelques défenseurs de la théorie newtonienne persistent. Jean-Baptiste Biot est de ceux-là. Cette controverse sur la nature de la lumière semble se résoudre rapidement sur des arguments de simplicité et d'efficacité, mais ses opposants fervents poursuivent le débat.

---

[95] Biot, J.-B. (1860). Introduction aux recherches de mécanique chimique dans lesquelles la lumière polarisée est employée auxiliairement comme réactif. Paris, Mallet-Bachelier.

[96] Fox, R. (1974). "The rise and fall of Laplacian physics." Historical studies in the physical sciences **4**: 89-136.

[97] Tobin, W. (2002). Léon Foucault. Paris, EDP Sciences.

En 1839, au moment de la publication des premiers travaux d'Edmond Becquerel, il est engagé dans cette controverse qu'on pourrait croire achevée. Il poursuivra son argumentaire défendant la théorie corpusculaire jusqu'à la fin de sa vie en 1862, ne concédant jamais la victoire à la théorie ondulatoire.

Le seul texte qu'il publie dans lequel il émet un doute sur la réalité de la théorie newtonienne paraît en 1846 dans l'introduction de son mémoire intitulé « *sur les modifications qui s'opèrent dans le sens de la polarisation des rayons lumineux lorsqu'ils sont transmis à travers des milieux solides ou liquides soumis à des influences magnétiques très puissantes*[98] ». Dans ce texte, il développe l'idée que les deux théories concernant la nature de la lumière ne sont que des « conceptions » et que ce ne sont « *que de pures abstractions de notre esprit, que les indications ultérieures de l'expérience pourront nous faire modifier, étendre, réunir, ou disjoindre* ». Il y présente les différentes caractéristiques de chacune des théories qu'il faudrait préciser, et prouver par l'expérience, afin que l'une ou l'autre puisse être considérée comme vraie. Il ne cherche pas dans ce texte, dit-il, à « *discuter la probabilité relative de ces deux conceptions. Pour légitimer leur emploi, comme moyen de recherche, il suffit qu'elles soient toutes deux mécaniquement possibles* ». Nous ne détaillerons pas ici l'ensemble des caractéristiques qu'il juge nécessaires pour que l'une ou l'autre des théories puisse être « mécaniquement admissible ». Il conclut l'introduction de son mémoire en déclarant :

« *Heureusement, il n'est pas indispensable de se décider entre ces deux conceptions pour décrire de simples apparences phénoménales, comme j'ai ici à le faire.*[…] *Je n'ai personnellement d'autre opinion qu'un doute absolu. Seulement, comme l'idée de l'émission est beaucoup plus commode pour les énoncés, par simplicité des conditions géométriques de l'emploi, je m'en servirai occasionnellement, dans cette exposition, si j'en ai besoin ».*

Jean-Baptiste Biot continue donc à utiliser la « théorie de l'émission », qui est la théorie newtonienne, mais déclare que c'est par souci de simplicité, parce qu'elle est plus évidente pour lui. Il lui donne ici le même statut que la théorie ondulatoire, ce sont deux conceptions qui ont la même validité, tant qu'elles ne restent que des outils, mais n'en ont aucune, si l'on cherche à les considérer comme décrivant la réalité.

[98] Biot, J.-B. (1846). Sur les modifications qui s'opèrent dans le sens de la polarisation des rayons lumineux lorsqu'ils sont transmis a travers des milieux solides ou liquides soumis à des influences magnétiques très puissantes. Paris, Imprimerie Royale.

Ce choix méthodologique, même s'il lui est imposé par les circonstances, le rapproche de César et Edmond Becquerel. S'il est possible de ne pas décider entre différentes conceptions théoriques, il est souhaitable pour eux aussi de ne pas le faire. Mais ces chercheurs diffèrent sur la démarche d'investigation scientifique. Biot utilise un modèle théorique en reconnaissant qu'il n'est pas représentatif d'une réalité, quand les Becquerel cherchent à ce que leurs travaux soient représentatifs de la réalité, en dehors de tout modèle théorique.

Il nous faut ici remarquer que la définition que donne Jean-Baptiste Biot de ce qu'il nomme conception est très proche de ce que les scientifiques actuels nomment modèles. Si la notion de modèle, sous d'autres appellations, est présente dans les réflexions des astronomes depuis longtemps, elles semblent étrangères, à l'époque, aux physiciens. Biot construit ici cette notion dans le cadre du débat sur la nature de la lumière. Il ôte ainsi aux considérations mises en jeu le statut de théorie pour leur attribuer le statut de modèle. Il est intéressant de noter que l'apparition de ce concept est justifiée par la nécessité qu'a Biot de s'affranchir des oppositions de ses contemporains. L'ensemble des travaux qu'il présente dans ce mémoire ont été développés en utilisant un modèle corpusculaire de la lumière. Ils risquent donc, à une époque où ce point de vue est rejeté par la communauté, d'être aussi rejetés. Afin de se protéger, et de défendre la qualité de ses travaux, Biot est conduit à introduire le concept de modèle dans les recherches sur la lumière de son époque. Sa construction est pour lui une nécessité.

Il est donc probable qu'en 1839 Jean-Baptiste Biot soit encore convaincu de la valeur de la théorie corpusculaire, par rapport à toute autre théorie.

Jean-Baptiste Biot est de plus académicien depuis de nombreuses années, et fidèle opposant de François Arago. Les raisons qui justifient cette opposition sont nombreuses, et ne sont pas toutes d'ordre scientifique. Ils ont ensemble été envoyés, des années plus tôt, par l'Académie des sciences dans une expédition qui s'est mal déroulée, et a laissé entre les deux hommes une rancœur intense. Arago a, comme nous l'avons dit, quitté la société d'Arcueil, et rejeté certaines de ses positions. Il a ensuite, sur les bases de cette querelle, soutenu et porté Fresnel afin qu'il parvienne à achever son travail et ainsi invalider les nombreux travaux de Biot sur la lumière[99]. Arago s'est, de plus, intéressé aux substances photosensibles et les a

[99] Buchwald, J. Z. (1989). "The battle between Arago and Biot over Fresnel." Journal of optics **20**(3): 109-117.

utilisées dans une expérience citée par Fresnel comme une preuve supplémentaire de l'exactitude de la théorie ondulatoire[100]. Il soutiendra Edmond Becquerel dans le déroulement de son travail et déclarera en 1842 qu'il avait, dès la publication du procédé Daguerréotype, annoncé que celui-ci apporterait des éléments importants « *dans l'intérêt des théorie de la lumière*[101] »[102].

Biot est, en 1840, le doyen de la faculté des sciences de Paris, institution dans laquelle Edmond Becquerel soutient sa thèse. Il est le dernier juge lors de la validation de cette thèse, après sa soutenance.

Il occupe donc une place centrale dans la communauté scientifique de l'époque, et ses prises de positions, ses avis et ses objections sont nécessairement prises en compte par cette communauté. Ses réactions jouent inévitablement un rôle essentiel dans la carrière et les travaux d'un jeune chercheur, même porteur d'un nom illustre, ou le devenant. Edmond Becquerel ne peut éviter d'être sensible aux arguments développés par Biot. Tout d'abord, en tant que chercheur en devenir, il est essentiel pour lui de prendre en compte les arguments d'un scientifique reconnu et important.

Enfin, Jean-Baptiste Biot et Edmond Becquerel ont travaillé ensemble. Dès son arrivée comme assistant au Muséum, il est « prêté » par son père à la faculté des sciences pour assister pendant quelques temps Biot dans ses recherches. Les deux hommes se connaissent, et ont peut-être même discuté de la nature de la lumière ensemble, sans que cela ne laisse de traces imprimées.

Cela peut nous éclairer sur l'importance qu'ont pu accorder les deux générations de Becquerel à la naissance de cette controverse, et expliquer en partie pourquoi, à chaque message de l'un, l'autre répond immédiatement.

3.2. Le schéma intellectuel sous-jacent aux travaux de Becquerel

Afin de comprendre sur quoi porte réellement le débat qui oppose Edmond Becquerel à Jean-Baptiste Biot il nous faut tout d'abord identifier quel schéma intellectuel utilise

[100] Fresnel, A. (1866-1870). Oeuvres complètes. Paris, Susse Frères Editeurs.

[101] Arago, F. (1842). "M. Arago rappelle qu' il signala les expériences que M. Becquerel vient de faire." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **14**: 903-904.

[102] Nous n'avons pu trouver aucune trace de cette déclaration d'Arago dans ses communications de 1839 et 1840. Celle-ci positionne cependant son soutien à Becquerel, de la même manière que celui qu'il avait apporté à Fresnel, en opposition à Biot.

Becquerel lorsqu'il débute la construction de ses appareils. C'est en effet sur ce contenu que se déroulera la controverse.

Le cheminement intellectuel que nous pouvons identifier par l'analyse des publications qu'il produit dès 1839 n'est pas directement explicité. Cependant, les principes de fonctionnement du premier appareil qu'il décrit peuvent nous permettre de le reconstruire.

César Becquerel a montré, quelques années plus tôt, que toute réaction chimique peut produire des effets électriques, mesurables, et que ces effets sont directement liés à l'intensité de la réaction qui se produit. Il a reçu pour ce travail la médaille Copley. C'est le point de départ des réflexions d'Edmond Becquerel[103].

Le fonctionnement de son appareil laisse apparaître qu'Edmond Becquerel pose comme première hypothèse implicite, qu'une réaction chimique se produisant sous l'effet de la lumière, c'est-à-dire photochimique au sens actuel du terme, est une réaction chimique classique, et que de ce point de vue, elle doit produire de la même manière des effets électriques, mesurables. Il serait donc possible, par ces effets électriques évalués par l'intermédiaire d'un galvanomètre, d'évaluer la quantité de matière qui entre en jeu dans la réaction, lors de l'éclairement des réactifs. Il peut alors utiliser les principes établis par son père en considérant que le courant produit par une réaction, sous l'effet de la lumière, est proportionnel à la quantité de substance qui réagit dans celle-ci.

La seconde hypothèse plus explicite d'Edmond Becquerel est que les courants électriques mesurés lors de ces réactions peuvent lui permettre de tirer des conclusions directes sur la quantité de lumière intervenant dans celle-ci. Il ne s'agit pas ici d'intensité lumineuse, mais plutôt, comme il le dit lui-même de " *nombre de rayons actifs* ". Il postule que la quantité de substance qui réagit lors d'une réaction photochimique est directement proportionnelle à la quantité de rayons que reçoivent ces substances. Il déclare d'ailleurs dans sa thèse qu'« *en étudiant la production des courants électriques* [il a] *cherché à représenter le nombre de rayons qui agit sur les lames et surfaces de séparation des liquides*[104] ». C'est cette considération qui l'amène, dans sa première communication à l'Académie des sciences, à représenter le « *nombre de rayons chimiques qui traversent les écrans, en représentant par*

[103] Becquerel, A. C. (1832). "Considérations générales sur les changements qui s'opèrent dans l'état électrique des corps par l'action de la chaleur, du contact, du frottement et de diverses actions chimiques, et sur les modifications qui en résultent quelquefois dans l'arrangement de leurs parties constituantes." Mémoire de l'Académie des sciences et de l'institut de France **11**: 317-368.

[104] Becquerel, E. (1840). Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire; thèse de physique présentée et soutenue à la faculté des sciences de Paris en août 1840. Paris, typographie Firmin Didot frères.

100 le nombre de rayons incidents[105] » c'est-à-dire à considérer que l'effet de filtration des écrans diminue la quantité de rayons, mais ne change pas la composition de la lumière. C'est, comme nous l'avons dit précédemment, ce point qui déclenchera la première réaction de Jean-Baptiste Biot.

Nous pouvons schématiser son raisonnement de la manière suivante :

Quantité de rayons
|
proportionnelle à
↓
Quantité de substance réagissant
|
proportionnelle au
↓
Maximum de déviation du galvanomètre

Si la première hypothèse que nous identifions n'a pas besoin d'être explicitée, puisque l'observation simple de divers types de réactions photochimiques le laisse penser, par l'apparition de précipités ou la disparition de certaines espèces chimiques, la seconde hypothèse[106] en revanche est lourde de conséquences, et semble porter des implications théoriques fortes concernant la nature de la lumière.

On peut en effet déjà soumettre l'idée, qui sera développée plus loin, que le simple fait de considérer cette proportionnalité, et que l'on puisse effectuer des rapports d'effet de la lumière sur la matière, en réalisant des rapports de courant produit pour chacun de ces différents effets, laisse apparaître une conception ondulatoire de la lumière. En effet, cela suppose que l'on considère que les effets mesurés ne sont provoqués que par une seule cause. Cette cause, même si elle n'est pas identifiable, considérée dans son unicité, permet de comparer différents effets, obtenus dans différentes conditions. Si l'on refuse l'unicité de cette

[105] Becquerel, E. (1839). "Recherche sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 145-149.

[106] Nous choisissons ici d'attribuer à ce point le statut d'hypothèse, dans la mesure ou il sera démontré vérifiable, puis vérifiée en 1876, par Egoroff dans :Egoroff, N. (1876). "Electro-actinomètre différentiel." Ibid. **82**: 1435-1438.

cause, puisque l'on est incapable de déterminer le nombre de celles-ci, et les proportions respectives des effets produits par chacune, on ne peut admettre une proportionnalité persistante lors des modifications effectuées sur les appareils, telles que l'ajout d'écran.

3.3.Le déroulement de la controverse

La controverse qui se déroule entre Edmond Becquerel et Jean-Baptiste Biot débute le 5 août 1839[107] lorsque ce dernier réagit à l'Académie des sciences au mémoire lu la semaine précédente par César Becquerel au nom de son fils. Son but annoncé est de *« prévenir des inexactitudes d'interprétation, qui pourraient donner une direction fausse aux recherches du physicien, dans une carrière si riche, mais si nouvelle encore* ». Cette première remarque, introductive au texte de Biot, le positionne délibérément en tant que chercheur expérimenté, souhaitant aider et soutenir un jeune physicien en devenir. C'est certainement pour cette raison qu'à la fin de cette communication César Becquerel réagira, réaction retranscrite dans les comptes rendus de l'Académie des sciences[108]. Il présente ainsi son fils comme accompagné dans ses recherches par un scientifique reconnu, lui-même, invalidant ainsi la position que prend Biot.

Le contenu de cette remarque est essentiellement composé d'observations expérimentales. Il s'agit pour lui de mettre en évidence la complexité de l'étude des effets de la lumière sur les réactions photochimiques. Il y détaille les effets particuliers et inexplicables sur la résine de gaïac. Il y présente aussi les résultats des expériences réalisées par Malaguti semblant montrer que les effets chimiques de la lumière sur le chlorure d'argent sont renforcés parfois par l'interposition d'un écran. En cela, il semble considérer que le choix de la proportionnalité, entre le courant mesuré et la quantité de rayon qui agissent, est abusif. De cela, il conclut que l'appareil construit par Becquerel ne permet pas de « *mesurer les quantités relatives des radiations, par les effets électriques qu'elles excitent* ». L'appareil peut être utilisé « *comme un indicateur du pouvoir qui l'excite, si on l'applique comparativement quand il s'exerce et quand il ne s'exerce pas. Mais des appareils indicateurs ne sont pas nécessairement des mesureurs. Tout effet résultant d'une cause physique ne lui est pas pour cela proportionnel* ».

[107] Biot, J.-B. (1839). "Remarque de M.Biot sur note lue par M. Becquerel." Ibid. **9**: 169-172.

[108] Becquerel, A. C. Ibid."Réponse de M. Becquerel à M. Biot (suivi d'une remarque de M. Biot)." 172-174.

Il remet donc en cause dans cette remarque la proportionnalité que Becquerel considère comme réelle. Mais la raison pour laquelle il la remet en cause, présente en filigrane au sein de ses arguments, est que ces effets peuvent être produits par divers corpuscules, dont on ne connaît ni le nombre ni les effets respectifs. On ne connaît d'eux que l'effet global qu'ils produisent lorsqu'ils sont reçus ensemble. Puisqu'il est impossible de connaître « *les quantités relatives des radiations* » qui sont filtrées par les écrans utilisés, accepter la proportionnalité est pour lui impossible.

En effet, dans le modèle corpusculaire de la lumière que défend Jean-Baptiste Biot, il existe une grande variété de corpuscules, qui diffèrent principalement par leurs propriétés de vitesse et leurs formes, que l'on ne peut identifier que par les effets qu'ils produisent. Mais il faut pour cela connaître chacun de ces corpuscules, et les effets de chacun sur la matière. L'objection de Biot concerne le fait qu'il est impossible de connaître le nombre et la variété des types de corpuscules qui agissent pour produire les effets chimiques, et qu'il est impossible de connaître les effets des filtres sur chacun de ces corpuscules. Il est donc exclu de considérer une proportionnalité, puisque l'on ne peut accéder aux quantités relatives de chacun dans les différents cas étudiés par Becquerel.

Cette prise de position, qui sera précisée dans les réactions suivantes, ne manifeste pas explicitement de considérations théoriques mettant en avant le modèle corpusculaire de la lumière. Aucune réaction de Biot n'en fera explicitement mention. Il ne peut pas en 1839, alors qu'il est l'un des derniers défenseurs de cette théorie, prendre une position aussi affichée. Mais le contenu de ses remarques nous permet de le repérer. Il conclut son intervention en déclarant que cet appareil, « *en considérant ce procédé comme un simple indicateur de différence, pourra être souvent très utile, puisqu'il exprimera exactement un caractère propre à la résultante complexe de l'action totale* ». On voit encore ici qu'il considère la lumière qu'étudie Edmond Becquerel comme l'association des effets de nombreux éléments, à laquelle on ne peut accéder que dans son ensemble, mais pas dans ses parties.

Les phrases que nous extrayons sont réparties tout au long de ce texte, au milieu de remarques concernant des points traitant de la précision expérimentale, et proposant des expériences de vérification que nous avons exposées dans la seconde partie de ce mémoire.

Immédiatement après cette remarque est retranscrite dans les comptes rendus de l'Académie des sciences la réponse que lui fait César Becquerel. Il réagit en attestant de la proportionnalité qui existe entre l'intensité de la réaction chimique et l'intensité du courant

mesuré. Il ne remet pas en question, fidèle à son choix de ne pas prendre de position théorique inutile, l'idée qu'il puisse y avoir différents effets chimiques, mais il considère que même dans ce cas-là, « *on ne peut nier que les effets obtenus ne puissent servir de mesures à la résultante des effets chimiques de la lumière, et par suite à la résultante du nombre de rayons chimiques en actions*[109] ». Il considère donc que, quelle que soit la théorie employée, qu'il y ait un seul type de rayonnement, comme dans la théorie ondulatoire, ou un grand nombre de corpuscules, comme dans la théorie newtonienne, les mesures qu'effectue son fils concernant l'effet global produit ne sont pas remises en question.

Il ne prend pas en compte dans sa remarque le fait que Biot puisse considérer que les différents types de corpuscules ne se comportent pas de la même façon sous l'effet des filtres par exemple.

Biot réagit de nouveau immédiatement après l'intervention de César Becquerel en signalant que ces remarques *« ne lui semblent pas du tout répondre à l'objection qu'il a faite. Cette objection ne porte pas sur la mesure des effets chimiques par le galvanomètre ; mais sur ce que la radiation solaire, ou atmosphérique, étant composée de rayons hétérogènes, qui agissent quelquefois en sens contraires, un effet produit par leur somme totale, n'est pas proportionnel à leur nombre, et ne peut conséquemment pas l'indiquer* ». C'est dans cette dernière observation de Jean-Baptiste Biot qu'apparaît précisément le détail de ses conceptions, qu'il précisera plus tard. La lumière est selon lui hétérogène, composée d'un nombre inconnu de corpuscules, possédant chacun des propriétés spécifiques, dont on ne connaît que l'effet global produit.

Le mémoire que présente Edmond Becquerel le 4 novembre 1839[110] à l'Académie des sciences est une réponse à certaines remarques de Jean-Baptiste Biot. Mais il ne concerne que les points de précision expérimentale soulevés par ce dernier. Il y analyse les effets de la lumière sur le platine pur, et cherche à s'assurer que les effets mesurés ne sont pas dus « *aux rayons calorifiques* », c'est-à-dire à un échauffement des plaques ou du liquide. Nous avons détaillé cette expérience précédemment. Il ne fait pas mention dans ce mémoire des oppositions théoriques de Jean-Baptiste Biot.

[109] Ibid.

[110] Becquerel, E. Ibid."Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires." 561-567.

Ce mémoire cependant soulève une nouvelle réaction de ce dernier, qui paraît le 11 novembre 1839[111] dans les comptes rendus. Celle-ci est justifiée, selon lui, par le fait qu'il lui «*a paru renfermer une légère inexactitude* [qu'il] *croit utile de signaler, pour conserver aux résultats obtenus la fidélité d'interprétation nécessaire à leur utilité future* ». C'est donc bien sur l'interprétation des résultats que Biot réagit. Il y regrette que les remarques qu'il a faites précédemment à Edmond Becquerel *« ne paraissent pas avoir produites sur son esprit l'effet* [qu'il] *en espérait* », puisque ces nouveaux travaux semblent se poursuivre dans la même voie. Le ton de cette phrase semble plutôt méprisant, ajouté au fait qu'il n'hésite pas à lui rappeler, au début de chacune de ses remarques, qu'il est un jeune chercheur, sans reconnaissance encore. Pour préciser sa pensée il décide de traduire ces réflexions sous forme mathématique.

Son raisonnement est le suivant : si l'on envoie une radiation composée de trois groupes de rayons A, B et C, sur une substance chimique donnée, on aura un effet global. Si l'on interpose alors successivement trois écrans (filtres) sur le parcours de cette radiation, interceptant chacun l'un des groupes de rayons, on aura successivement trois effets produits. D'abord B+C si l'écran intercepte A, puis A+C si l'écran intercepte B, et enfin A+B si l'écran intercepte C. On aura donc quatre effets distincts, A+B+C, A+C, B+C, A+B. Il est impossible de considérer, selon lui, que ces effets puissent être proportionnels, puisqu'ils ne sont pas produits par les mêmes causes. Il ne se positionne pas explicitement dans un modèle corpusculaire de la lumière, mais le simple fait qu'il considère que celle-ci se compose de différentes parties, agissant différemment, reflète cette position.

Pour la première fois Edmond Becquerel réagit aux propos de Biot le 25 novembre 1839[112] en adressant une lettre qui traite de cette question. L'objectif de ce courrier est de préciser les informations contenues dans les mémoires adressés à l'académie précédemment, les observations de Jean-Baptiste Biot lui « *ayant prouvé* [qu'il] *n'avait pas exposé les faits qui y sont relatés avec assez de clarté pour être bien compris* ». Cette réponse, qui est la première que rédige Edmond Becquerel répondant précisément aux objections décrites précédemment, emploie un ton suffisamment révérencieux envers Biot pour que l'on y sente une certaine forme d'ironie. Il conclut d'ailleurs sa lettre en déclarant « *d'après les*

[111] Biot, J.-B. Ibid."Note de M. Biot sur le compte rendu de la dernière séance." 579-581.

[112] Becquerel, E. Ibid."Sur les effets électriques qui se produisent sous l'influence solaire- Lettre de M. Edmond Becquerel (suivi d'une réaction de M Biot)." 711-713.

explications que je viens d'avoir l'honneur de présenter à l'Académie, je pense que je serais parfaitement d'accord avec M. Biot, dont les conseils sont pour moi d'un grand prix ». Il est en effet assez curieux de conclure un texte en affirmant que suite à son propre discours, sans que l'interlocuteur ne se soit exprimé de nouveau, on est d'accord avec lui. Il faut rappeler qu'Edmond Becquerel doit à cette époque rester prudent, puisqu'il n'a pas encore soutenu sa thèse devant la faculté des sciences, dont Biot est le doyen.

Sa réponse ne contient, elle non plus, aucun contenu théorique explicite. Il déclare simplement que l'observation de Biot concernant la diversité des rayons ne concerne pas son travail, puisqu'il se contente d'étudier le courant électrique produit lors de l'exposition dans les régions les plus réfrangibles de la lumière solaire. Selon lui, ces rayons sont d' « *une seule sorte »*, ce sont les rayons chimiques, on peut donc considérer les effets comme proportionnels, « car *les nombres trouvés expriment toujours la résultante des effets chimiques produits, et c'est de cette détermination seule dont on a besoin dans les expériences*». Edmond Becquerel semble donc considérer que, au moins pour le rayonnement qui agit sur les substances photosensibles, il n'existe qu'un seul type de rayons, et qu'on peut dans ce cas considérer que les effets qu'ils produisent sont proportionnels à leur nombre. À aucun moment il ne dit se positionner dans un modèle ondulatoire, la différence qui réside entre la perception des deux hommes concerne la diversité des rayons qui agissent. Mais cette unicité, mise en relation avec la multiplicité défendue par Biot, correspond à une distinction fondamentale entre la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire.

Immédiatement après la lecture de cette lettre à l'Académie des sciences Jean-Baptiste Biot réagit de nouveau, de manière extrêmement brève mais extrêmement précise. Cette réaction est retranscrite dans les comptes rendus de l'Académie des sciences à la suite immédiate de la lettre de Becquerel. Nous la livrons dans son intégralité :

« *Après avoir entendu cette lettre, M. Biot dit « qu'il regrette de ne pas pouvoir partager les idées théoriques qu'elle renferme. L'intérêt même qu'il porte aux ingénieuses recherches de M. Edmond Becquerel, le détermine à présenter dans la séance prochaine les motifs de son dissentiment ».* ».

Cette remarque si elle est courte, a le mérite de mettre en évidence le fond du débat qui oppose les deux hommes. Ce sont bien les idées théoriques contenues dans le travail de Becquerel qui posent problème à Jean-Baptiste Biot. La controverse, qui semble se dérouler

sur des points expérimentaux, porte en réalité, et c'est Biot qui l'affirme lui-même, sur un désaccord théorique de fond. Il n'explicite pas le contenu de ce désaccord, mais il semble impliquer leurs conceptions respectives de la nature même de la lumière. Il faut noter que la phrase de Biot est entre guillemets dans les comptes rendus de l'Académie des sciences. Le secrétaire perpétuel étant à cette époque Arago, doit-on y voir l'expression de l'opinion du rédacteur, considérant que cette position n'engage que son auteur ?

Dès la semaine suivante paraît dans les comptes-rendus de l'Académie des sciences le texte annoncé par Biot. Il s'intitule *« remarques sur quelques points de la théorie des radiations, en réponse à une lettre de M. E. Becquerel*[113] ». Il est tout à fait clair cette fois, dans le titre même, que le « dissentiment » dont parle Biot porte sur un désaccord théorique. Il introduit son texte en déclarant que « *l'Académie s'apercevra aisément que ce qui va suivre a un but purement scientifique : ce n'est ni une polémique, ni une controverse. Il ne peut y avoir rien de tel, de ma part, envers un jeune homme dont j'apprécie le zèle et l'esprit inventif, autant que j'aime sa personne* ». On peut se demander ce qui conduit Jean-Baptiste Biot à se défendre de la sorte dès son introduction. Il est possible, dans la mesure où la théorie corpusculaire a considérablement perdu de sa crédibilité à l'époque, qu'il ait reçu des remarques de la part d'autres chercheurs concernant sa prise de position. Nous n'avons aucune trace de cela. Il est intéressant de constater qu'il se défend d'engager une controverse, qui pourtant semble évidente a posteriori. Ses contemporains l'ont-ils ressenti comme telle eux aussi ?

Ce texte est très long, pour une communication à l'Académie des sciences, puisqu'il s'étale sur huit pages. Il est construit autour de nombreux exemples permettant à Biot de mettre en évidence, selon lui, « *l'hétérogénéité des rayons actifs* ». Ces exemples le conduisent *« à considérer généralement les radiations émanant des corps composées, non de deux, ou de trois, mais d'une infinité de rayons, ayant des qualités et des vitesses diverses, susceptibles d'être émis, absorbés, réfléchis, réfractés ; et qui, selon leurs qualités propres, parmi lesquelles il faut comprendre leur nature et leurs vitesses actuelles, peuvent produire la vision, la chaleur, déterminer ou favoriser certains phénomènes chimiques, et probablement exercer beaucoup d'autres actions encore inconnues, lorsqu'ils sont reçus par des corps ou par des organes sensibles à leurs impressions* ». Là encore il ne parle pas explicitement de

[113] Biot, J.-B. Ibid."Remarques sur quelques points de la théorie des radiations, en réponse à une lettre de M. E. Becquerel, lue à la dernière séance, et insérée au Compte rendu." 719-726.

théorie corpusculaire. Mais distinguer les différentes radiations par leurs vitesses, et leurs qualités propres, le positionne très clairement dans ce cadre théorique, nettement distinct du cadre ondulatoire, dans lequel la vitesse est unique pour toutes les radiations. On peut d'ailleurs noter, dans la syntaxe de la phrase de Biot, que chaque rayon possède une seule nature (leur nature), mais plusieurs vitesses possibles puisqu'il en existe certaines actuelles, et plusieurs vitesses actuelles (leurs vitesses actuelles). Si l'on y voit des vitesses de rotation, ce qui est courant dans la conception de Biot, on doit admettre que ces rayons sont des corpuscules.

Les exemples qu'il donne pour justifier de sa position porte sur l'observation de phénomènes qui se déroulent, sous l'effet de la radiation solaire, alors qu'elle ne provoque pas de sensation de lumière sur la rétine. Il utilise en particulier le phénomène de production d'oxygène par les plantes exposées à la lumière, décrivant des expériences qu'il a réalisées montrant que le phénomène ne peut pas se produire, avec l'agave americana, si la lumière a traversé une couche d'eau avant d'éclairer la plante, alors que l'œil est incapable de discerner une différence entre cette lumière et la lumière solaire directe. Un autre exemple qu'il donne est l'existence de poissons possédant des yeux alors qu'ils vivent à des profondeurs où la lumière ne semble pas parvenir. Puisqu'« *il n'y a pas d'exemple d'un animal ayant un organe très développé qui ne lui serve point* » ces poissons voient selon lui probablement, mais leur vision est provoquée par des éléments contenus dans la lumière, qui ne provoque pas de sensation sur notre œil. Ces exemples lui permettent d'affirmer que la lumière est accompagnée d'autres éléments, ne provoquant pas de sensation lumineuse pour l'humain, mais qui agissent sur d'autres formes de vie. Ces éléments ne sont donc pas de la lumière, mais se déplacent avec elle.

Son argumentaire, basé sur des exemples, est extrêmement complexe et tortueux. Il ne fait pas état d'éléments de théorie permettant de justifier ces considérations. Il accumule les descriptions, afin de justifier de l'existence d'une infinité de rayons aux propriétés spécifiques, que l'on ne peut discerner, et dont on ne peut préciser les effets. On n'a accès qu'à une partie de ceux-ci, on ne peut donc déterminer leurs nombres et leurs proportions respectives.

Ce texte ressemble plutôt à un plaidoyer qu'à un argumentaire scientifique. Biot ne s'adresse plus uniquement à Edmond Becquerel, mais semble destiner son texte à l'ensemble de la communauté, cherchant à montrer qu'il y a des exemples qui nécessitent de considérer que la théorie corpusculaire est encore valide.

Edmond Becquerel ne réagit pas officiellement à ce texte. Il travaille apparemment à la rédaction de sa thèse qu'il soutiendra au mois d'août 1840. Jean-Baptiste Biot étant doyen de la faculté des sciences, c'est probablement par prudence qu'aucune réponse n'est faite à cette communication. Celle-ci présentant directement un contenu théorique obligerait probablement Edmond Becquerel à s'impliquer dans le débat sur la nature de la lumière, en s'opposant au doyen de la faculté dans laquelle il doit soutenir sa thèse. Il ne sera pas fait mention de ce débat dans le mémoire de thèse d'Edmond Becquerel, et la reconstruction de l'ordre des expériences réalisées, comme nous l'avons montré dans la deuxième partie, gomme les remarques de Biot.

Les travaux suivants que publie Becquerel au sein de l'Académie des sciences se rapportent essentiellement à des recherches en photographie. Biot ne réagit pas à ces travaux, qui n'ont aucune implication concernant le débat précédant. L'intervention officielle suivante concernant les travaux d'Edmond Becquerel que nous pouvons identifier de la part de Biot apparaît le 11 janvier 1841 lorsqu'il rédige le rapport[114] de l'Académie des sciences sur le mémoire intitulé « *recherches sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire et la lumière électrique* ». Biot est alors rapporteur de la commission, Arago et Savary en sont les commissaires. Ce rapport, très descriptif, présente les expériences que les commissaires ont reproduites afin de vérifier les observations de Becquerel. Il contient peu de commentaires, mais la juxtaposition de ceux-ci est étonnante. La commission invite dans un premier temps Becquerel à faire « *les expériences nécessaires pour décider l'alternative d'interprétation dont ses résultats actuels sont susceptibles ; laquelle consiste à savoir s'ils exigent nécessairement l'existence d'une propriété spéciale des rayons chimiques, dont les uns seraient à la fois excitateurs et continuateurs, tandis que les autres seraient seulement continuateurs, comme il l'a supposé, ou si comme nous le croyons plus probable, la différence de ces effets successifs tiendrait seulement un changement d'affection et d'impressionnabilité, résultant du changement de nature chimique ou moléculaire de la substance impressionnée* ». La commission invite donc Edmond Becquerel à proposer de supprimer la distinction qu'il crée entre différentes sortes de rayons chimiques, ce qui revient à tenter d'unifier le rayonnement. Cette remarque est probablement proposée par Arago, défenseur de la théorie ondulatoire. Quelques lignes plus loin, la commission lui propose d'étudier la persistance des réactions photosensibles lorsque la source de lumière est supprimée. La question que pose le

[114] Biot, J.-B., F. Arago, et al. (1841). "Rapport sur un mémoire de M. Edmond Becquerel, intitulé: Recherches sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire, et la lumière électrique." Ibid. **12**: 101-112.

rapport est la suivante : « *ne serait-ce pas qu'elles deviendraient alors sensibles aux radiations qui émanent même des corps non lumineux ? Et ce dernier genre de radiations ne pourrait-il pas aussi être postérieurement efficace, dans une infinité de circonstances où l'on n'a pas jusqu'à présent soupçonné son action ?* ». Il nous semble ici retrouver l'une des remarques de Biot concernant l'existence de rayons dont les propriétés ne sont pas de provoquer la sensation lumineuse mais peuvent être diverses, et émaner des corps non lumineux. Ce point n'est pas développé dans le rapport, il nous est donc difficile d'en tirer une conclusion précise. Cependant le fait que ces deux propositions soient juxtaposées donne à ce rapport un aspect inachevé, laissant transparaître une indécision, voire un désaccord entre les différents membres de la commission.

On ne trouve ensuite plus aucune trace dans les comptes rendus de l'Académie des sciences de cette controverse qui oppose Jean-Baptiste Biot à Edmond Becquerel. Il semble pourtant qu'elle se poursuive, en dehors des structures officielles. Dans son mémoire intitulé « *sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière sur les effets électriques qui en résultent*[115] » qu'Edmond Becquerel présente à l'Académie des sciences le 26 juillet 1841, il déclare en effet lorsqu'il décrit les prismes qu'il emploie pour ses expériences : « *le prisme d'alun m'avait été prêté par M. Biot, dont l'obligeance est pour moi très grande quand il s'agit de me faciliter les moyens de faire des recherches expérimentales* ». Doit-on entendre dans cette remarque que l'obligeance de Biot est considérablement moins grande lorsque Becquerel souhaite en tirer des conclusions théoriques ?

C'est en 1842 que Becquerel s'exprimera pour la première fois sur ses conceptions théoriques concernant la nature de la lumière. Dans son « *mémoire sur la constitution du spectre solaire*[116] » il conclut en effet en déclarant qu'il croit « *que l'hypothèse de Fresnel est exacte et même qu'elle peut être étendue* ». Il envisage de l'étendre en y incluant ce qu'il a nommé jusqu'à présent les rayons chimiques et les rayons phosphorogéniques[117]. La dernière phrase de ce mémoire, bien qu'anecdotique, est tout à fait éclairante sur la controverse. Si elle est terminée, ce dont on n'a aucune preuve, Edmond Becquerel en est certainement resté marqué. Il achève en effet ce mémoire en déclarant « *quant aux rayons lumineux, qui agissent*

[115] Becquerel, E. (1841). "Sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière et sur les effets électriques qui en résultent." Bibliothèque universelle de Genève: 136-159.

[116] Becquerel, E. (1842). "Mémoire sur la constitution du spectre solaire." Mémoire des savants étrangers, bibliothèque universelle de Genève **40**(2): 341-367.

[117] Cette expression désigne les rayons émis par les substances phosphorescentes.

sur la rétine, nous ne pouvons juger que d'après notre propre sensation ; mais il est probable que les rétines des différents êtres qui sont à la surface du globe ne sont pas toutes sensibles entre les mêmes limites de réfrangibilité. Nous en avons des exemples, entre autres dans les poissons, qui vivent au fond des mers et qui voient à se conduire là où il ne pénètre plus aucun des rayons qui seraient perceptibles à nos organes ». Il répond ainsi à l'un des exemples qu'avait donnés Jean-Baptiste Biot dans sa dernière remarque de l'Académie des sciences, dans laquelle il utilisait l'exemple des poissons des grands fonds pour justifier de l'existence de corpuscules accompagnant la lumière, mais n'ayant pas la faculté de donner des effets lumineux, qui leur permettraient de se déplacer dans l'obscurité complète. Edmond Becquerel y voit plutôt les limites de notre capacité de perception de la lumière. Ce que perçoivent ces poissons est bel et bien de la lumière, mais elle n'impressionne pas notre rétine. Le fait que Becquerel revienne, sans que cela soit indispensable pour son discours, puisque c'est la dernière phrase de la conclusion de son mémoire, sur l'un des exemples employés par Biot pour le contredire montre qu'il a été sensible à ces objections bien qu'il n'y ait pas répondu.

Son mémoire de 1843 intitulé « *des effets produits sur les corps par les rayons solaires*[118] » est encore plus explicite. Il le conclut en déclarant qu'il croit « *que les phénomènes lumineux chimiques et phosphorogéniques proviennent d'un seul et même agent dont l'action est modifiée suivant la nature de la matière sensible exposée à son influence et le genre de modification dont cette substance est susceptible* ». Il déclare ensuite qu'il croit en «*l'existence d'un seul et même rayonnement.* [Il a] *dû d'abord supposer ces rayonnements, des agents distincts, afin de montrer leur dépendance mutuelle, et arriver ensuite à la conclusion* (qu'il) *vient d'énoncer. On peut donc, pour simplifier la description des phénomènes, continuer à se servir de ces noms, rayons lumineux, chimiques, phosphorogéniques, sans attacher plus d'importance qu'il n'en faut aux mots qui désignent des parties différentes d'un même agent* ». Ce qui l'amène à cette conclusion est l'observation qu'il a faite de la présence de raies de Fraunhofer dans la lumière au-delà du violet, c'est-à-dire les ultraviolets. Le fait que ce rayonnement présente des propriétés identiques au rayonnement visible l'amène à la conclusion qu'il est de même nature. De plus, l'analyse de celui-ci s'effectue en étudiant

[118] Becquerel, E. (1843). "Des effets produits sur les corps par les rayons solaires." Annales de chimie et de physique **9**(3ième série): 257-322.

l'extrémité au-delà du violet du spectre de la lumière solaire. Ces rayons se situent donc, expérimentalement, dans la continuité du spectre de la lumière visible.

Dans ce cas, le rayonnement est unifié de l'extrémité visible rouge jusqu'à son autre extrémité bien au-delà du violet. Dans le même temps Drapper, à l'aide d'un appareillage totalement différent utilisant la réactivité de l'oxygène sur l'hydrogène en présence de lumière, a mis en évidence la présence de raies de Fraunhofer dans les infrarouges. Si toutes ces lumières sont de même nature, il est probable qu'il n'y ait qu'une seule nature pour tous les types de rayonnements. Il écrit d'ailleurs dans ce mémoire de 1843 que les rayons lumineux au-delà du violet « *existent, et ce qui le prouve, ce sont les raies que l'on trouve dans cette partie du spectre* ».

Dès ce moment, il est clair qu'Edmond Becquerel se positionne dans un modèle purement ondulatoire de la lumière, mais il affirme que l'emploi qu'il a fait précédemment des noms des différents rayons n'était qu'une marque de prudence permettant de les distinguer, le temps de s'assurer qu'ils étaient de même nature. Il apporte donc un argument supplémentaire permettant de considérer que la controverse qui l'a opposé pendant trois années à Jean-Baptiste Biot portait réellement sur un désaccord concernant la nature de la lumière.

3.4. Une théorie de la lumière dans les travaux d'Edmond Becquerel ?

Plusieurs éléments nous amènent à considérer que les travaux d'Edmond Becquerel, dès 1839, s'inscrivent dans une conception ondulatoire de la lumière. Tout d'abord le fait qu'il l'affirme lui-même en 1843 est un élément de réflexion. Mais comme nous l'avons montré pour son travail de thèse, il est possible que cette observation ne soit qu'une reconstruction a posteriori de ses recherches. Ensuite, le fait qu'Edmond Becquerel soit né en 1820, au moment où Fresnel achève ses travaux, est significatif. Les cours de physique qu'il a suivis enseignaient probablement la théorie de Fresnel. Celle-ci est en effet globalement acceptée par la communauté scientifique et très rapidement enseignée. Il est certain qu'il la connaît, et probable qu'il la maîtrise.

Mais l'élément le plus important nous permettant de considérer que les travaux d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière s'inscrivent dans un cadre ondulatoire de la lumière est la réaction que Jean-Baptiste Biot manifeste. La description chronologique de la controverse qui s'engage entre Biot et Becquerel à cette époque, que nous avons décrit précédemment, semble montrer que Jean-Baptiste Biot considère ces travaux comme

contradictoires avec la théorie corpusculaire dès 1839. Edmond Becquerel ne mentionnant pas à cette époque de cadre théorique, il est possible de penser qu'il réalise ses travaux sans avoir conscience de l'implication de ceux-ci dans un débat de fond. Il est certain en tout cas que dans sa démarche de recherche il ne cherche pas, par ses travaux expérimentaux, à apporter des arguments à l'une ou l'autre de ces théories. Sa démarche, fidèle aux enseignements de son père, est réellement expérimentale et exploratoire, et s'affranchit de choix théoriques. Il n'est certainement pas conscient lorsqu'il débute ses travaux qu'ils joueront un rôle dans ce débat. Cependant, les réactions de Jean-Baptiste Biot semblent montrer que ce dernier le perçoit. Nous pensons donc qu'il est possible de considérer que les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière s'inscrivent dès le début dans un cadre théorique ondulatoire, mais qu'il est concevable que cela se fasse à son insu. Sa formation, et l'époque à laquelle il étudie la physique, peuvent le conduire involontairement à appliquer des outils construits dans un cadre théorique spécifique sans qu'il puisse en prendre pleinement conscience, avant les objections de Biot.

C'est probablement le déclenchement de la controverse qui permettra à Edmond Becquerel de cerner le sens que peuvent porter ses travaux, de la même manière qu'elle nous a permis de l'identifier.

3.5.La fonction de la controverse dans le travail d'Edmond Becquerel

La controverse scientifique qui se déroule entre Edmond Becquerel et Jean-Baptiste Biot semble donc effectivement être générée, en toile de fond, par le débat théorique qui se déroule à l'époque sur la nature de la lumière. Mais comme nous l'avons dit, celui-ci est masqué par des observations et des remarques expérimentales de Jean-Baptiste Biot, qui ne sont, bien sûr, pas dénuées de sens et d'intérêt. Les oppositions qu'il fait d'un point de vue expérimental aux recherches de Becquerel participent à leur évolution et à l'amélioration des procédés employés. C'est pour répondre à l'une de ces objections, concernant les effets possibles de la lumière sur les plaques de platine nu qu'il est conduit à imaginer l'utilisation d'un procédé différentiel. Ce procédé sera employé pour l'invention de l'actinomètre électrochimique. C'est aussi pour répondre à une remarque de Jean-Baptiste Biot qu'Edmond Becquerel est conduit à constater qu'une couche d'impuretés à la surface du métal produit des effets électriques mesurables. C'est ce résultat qui l'amènera à imaginer de recouvrir ces plaques de substances photosensibles.

Cette controverse a donc permis l'évolution technique des appareils, la modification de ceux-ci, et la recherche d'une plus grande précision expérimentale. Sans l'intervention de Jean-Baptiste Biot, il est probable qu'Edmond Becquerel n'aurait pas pu aboutir aux résultats qu'il a obtenus. La controverse a donc été extrêmement enrichissante dans ses recherches.

Jean-Baptiste Biot est un expérimentateur de grand talent, reconnu par la communauté de son époque. Les remarques concernant des points expérimentaux ne peuvent pas être perçues, ou pas uniquement, comme un moyen de masquer un désaccord plus profond. Elles ont un sens, et les résultats qu'elles permettent à Edmond Becquerel d'obtenir en sont la preuve. Nous ne pouvons donc pas considérer que cette controverse est une controverse purement théorique masquée par un discours expérimental. Comme nous l'expliquons dans la dernière partie de ce travail, il s'agit probablement de l'imbrication de deux controverses, l'une portant sur l'exactitude expérimentale, l'autre portant sur le fond théorique. Ces deux controverses sont liées, et indissociables l'une de l'autre. Toutefois elles ne portent pas sur le même objet. Si la première peut être résolue par l'investigation expérimentale, la seconde ne le peut que par l'accord entre les protagonistes. Comme nous l'avons présenté, Jean-Baptiste Biot refusera toujours cet accord, cette controverse, entre les protagonistes impliqués ici est donc insoluble.

4. Vers une théorie du procédé photographique ?

La photographie est naissante à l'époque où se déroulent les travaux de Becquerel. Elle est le fruit du talent et de l'imagination d'expérimentateurs et d'artistes. Nicéphore Niepce, qui a été élève de l'Oratoire de Chalon-sur-Saône, a reçu une formation scientifique de base. Les oratoriens sont en effet sensibles aux disciplines scientifiques, et les incluent dans leurs programmes d'enseignement. Cependant sa formation scientifique ne se poursuit pas, puisqu'il intègre l'armée, et ne prolonge pas ses études dans ce domaine. Son activité scientifique est essentiellement expérimentale, et son invention du procédé héliographique est issue de son talent d'expérimentateur et d'inventeur.

Daguerre, quant à lui, est un artiste reconnu et un homme d'affaire avisé. De même que Niepce, sa formation scientifique n'est pas experte. L'usage qu'il développe des procédés de Niepce, d'abord en collaboration avec celui-ci puis après sa mort seul, est lui aussi essentiellement manipulatoire et expérimental. Si l'un comme l'autre savent décrire avec précision les opérations nécessaires à la réussite de leurs procédés, aucun d'entre eux n'aborde les questions théoriques concernant la réussite de ce procédé photographique.

À l'apparition publique de la photographie en 1839 on peut donc considérer qu'elle n'est qu'une technique, et un domaine artistique naissant, mais qu'elle est dépourvue de toute théorie. Les travaux qu'Edmond Becquerel réalise à partir de cette date sont les premiers qui permettent d'en aborder l'explication. Ils ne permettent pas de préciser théoriquement les phénomènes exacts qui se produisent lors de l'exposition de substances photosensibles à la lumière. Cependant ils conduisent à identifier les caractéristiques de leur sensibilité, et la nature de la lumière qui agit sur elles. Dans ce sens il est possible de considérer Edmond Becquerel comme l'un des premiers chercheurs à aborder sous un angle scientifique la question de la photographie. Les applications qu'il propose de ses résultats pour améliorer la sensibilité ou diminuer les temps de pause des daguerréotypes montrent l'intérêt qu'il a pour cette technique. La rapidité avec laquelle les résultats qu'il annonce sont appliqués par d'autres à la photographie met en évidence l'importance qu'accorde la communauté des photographes à ceux-ci.

Edmond Becquerel, peu enclin au développement de théories, n'explique pas sous cet angle les procédés photographiques. Mais ses travaux participent à leur amélioration, en permettant en particulier de préciser les conditions d'efficacité de ceux-ci.

La photosensibilité des halogénures d'argent restera un mystère bien au-delà de la carrière d'Edmond Becquerel. Ce n'est qu'en 1999[119] que pour la première fois une théorie complète et structurée de la modification du cristal de chlorure d'argent sera proposée. Il n'était pas question pour Becquerel de parvenir à ses résultats. Mais les travaux qu'il a produits le positionnent comme l'un des premiers, sinon théoricien du moins explorateur, des phénomènes chimiques photographiques.

5. La découverte de l'effet photovoltaïque ?

Edmond Becquerel occupe une place extrêmement réduite dans l'histoire des sciences. Ses travaux, ses résultats sont extrêmement mal connus. Les archives le concernant sont très souvent lacunaires, voire complètement absentes. On trouve sa trace dans les documents administratifs et officiels des lieux où il a travaillé et communiqué, mais ses archives personnelles ont souvent disparu. Ses documents privés, sa correspondance et ses notes, sont eux aussi pour la plupart perdus. Les courriers de sa main qui ont été conservés le sont la

[119] Belloni J., T. M., Remita H., Keyzer R. (1999). "De Enhancement yield of photoinduced electrons in doped silver halide crystals." Nature **402**: 865-867.

plupart du temps parce qu'ils sont adressés à des personnages célèbres. Les courriers qu'il a reçus sont perdus.

Une explication probable de cette disparition quasi complète de l'histoire réside dans la stratégie familiale mise en œuvre par César Becquerel et poursuivie par Edmond. Chaque génération de Becquerel occupant les positions scientifiques et sociales cédées par la génération précédente, ils se succèdent aux mêmes postes. Le fils d'Edmond Becquerel, Henri Becquerel lui succédera dans chacune des positions qu'il occupait. Il obtiendra le prix Nobel de physique aux côtés des Curie en 1903, et deviendra ainsi une fierté nationale. Le quasi-culte que ce prix engendrera conduira les institutions ayant accueilli Henri Becquerel à conserver avec le plus grand soin tous les documents qu'il a pu rédiger, ou même consulter. Cet archivage systématique, ajouté aux cérémonies d'anniversaire de sa naissance, de l'obtention de son prix, de sa mort, lors desquels les archives sont à chaque fois consultées depuis un siècle, a probablement conduit à la perte des archives de son père.

La position dans l'histoire des sciences qu'occupe César Becquerel, même si elle est moins honorée que celle d'Henri, a elle aussi favorisé cette éviction de l'histoire. Les dictionnaires biographiques et biobibliographiques mentionnent généralement Edmond comme étant le fils de l'un et le père de l'autre, et ne font que très rarement état de ses travaux, ou de manière très brève.

Le nom d'Edmond Becquerel reste dans l'histoire des sciences pour trois résultats. Tout d'abord son nom est associé à l'invention du phosphoroscope, appareil permettant l'analyse de la lumière produite par phosphorescence. Il est ensuite connu pour avoir été le premier à produire une photographie en couleur du spectre solaire. Mais il n'a jamais réussi à fixer cette photographie, dont l'image disparaissait au bout de quelques minutes si elle était exposée à la lumière. Il reste enfin dans l'histoire pour être celui qui en 1839 à découvert l'effet photovoltaïque. Nous noterons tout d'abord que les trois points décrits précédemment font référence à l'invention d'un instrument pour l'analyse de la lumière, au développement des procédés photographiques, et aux travaux sur la photosensibilité. Ces trois domaines sont présents et liés dans les recherches que nous analysons ici.

La découverte par Edmond Becquerel de l'effet photovoltaïque est le point pour lequel son nom est mentionné le plus souvent. La plupart des ouvrages, des brochures, ou des sites Internet, quelle qu'en soit la langue, qui traite de l'usage ou de l'amélioration de panneaux solaires, destinés à transformer l'énergie solaire en énergie électrique, le mentionnent dans leur introduction. Ils présentent l'effet photovoltaïque qui a lieu dans le matériau constituant le

panneau solaire comme une découverte réalisée par Edmond Becquerel en 1839. Il s'agit donc des travaux que nous avons analysés ici.

Il est alors intéressant de s'interroger sur la réalité de cette découverte. Si l'on entend photovoltaïque au sens où il y a création d'électricité sous l'effet de la lumière, son sens littéral, les travaux que réalise Edmond Becquerel en 1839 sont effectivement les premiers qui mettent en évidence un phénomène photovoltaïque. C'est le sens dans lequel il emploie lui-même ce terme dans ses publications.

Mais l'effet photovoltaïque qui se produit dans les panneaux solaires, est considérablement différent de celui qu'étudie Edmond Becquerel. Il s'agit en réalité de création d'électricité sous l'effet de la lumière, sur un matériau pur, dont les propriétés semi-conductrices permettent la génération de courant. Les travaux que mène Edmond Becquerel portent sur des réactions chimiques qui se produisent sous l'effet de la lumière. Il y a donc une transformation de la matière, par voie chimique, lorsque l'effet photovoltaïque se produit, alors que dans les cellules semi-conductrices, le phénomène qui se produit est de nature physique, sans modification de la matière. Edmond Becquerel explore effectivement ce champ, lorsqu'il cherche à vérifier si la lumière produit des effets sur les plaques de platine pur, nu. Mais il ne mesure pas d'effet quand les plaques sont parfaitement propres.

On peut donc, si l'on considère le terme dans son sens littéral, considérer qu'il est le découvreur, ou l'inventeur, de l'effet photovoltaïque. Il faut cependant reconnaître que cet effet n'a que très peu de rapport avec l'effet maîtrisé aujourd'hui, permettant de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Conclusion :

L'analyse du contenu théorique des travaux qu'Edmond Becquerel réalise entre 1839 et 1843 et des implications théoriques de celui-ci est extrêmement complexe. Cette difficulté est essentiellement due au fait qu'il cherche à éviter au maximum l'utilisation de théorie dans son travail. Mais il ne parvient pas à en éviter toutes les implications. C'est par l'analyse de la controverse qui se déclenche entre et lui Jean-Baptiste Biot que l'on peut accéder au contenu théorique concernant la nature de la lumière de ses travaux. Par un effet miroir, ou positif-négatif, pour reprendre une métaphore photographique, on peut comprendre la position implicite des travaux d'Edmond Becquerel dans un modèle ondulatoire de la lumière. Il ne mentionne pas durant les trois premières années de son travail ce modèle, mais le fait que Biot

s'y oppose en lui reprochant qu'il ne corresponde pas au modèle corpusculaire permet de l'aborder.

Cette controverse permettra à Edmond Becquerel de faire évoluer ses appareils et ses investigations, et d'aboutir aux résultats décrits précédemment. Elle sera, sous cet angle, extrêmement enrichissante pour la réussite de ses travaux, et pour la connaissance des phénomènes photosensibles. L'opposition de Jean-Baptiste Biot, si elle est motivée en partie par un désaccord théorique insoluble, n'est pas un frein à la découverte, mais un moteur permettant d'orienter celle-ci dans une direction qui lui sera bénéfique. Il est finalement intéressant d'observer que c'est l'acharnement de Biot qui favorisera la découverte de résultats affaiblissant un peu plus encore la théorie qu'il défend.

Les contenus théoriques, que ce soit sur la nature de la réaction chimique ou sur celle de l'électricité, ne peuvent pas être abordés par ce moyen. Ces travaux ne prennent pas position sur ces questions, et n'en imposent pas. Puisqu'ils peuvent être acceptés quel que soit le modèle dans lequel on se trouve, ils n'éveillent aucune réaction. C'est par les déclarations plus tardives d'Edmond Becquerel et de son père que l'on parvient à cerner leurs considérations théoriques, ou du moins à comprendre qu'ils cherchent à ne pas en avoir.

Les implications théoriques que peut avoir le travail d'Edmond Becquerel sont difficiles, elles aussi, à cerner. Il laisse son nom dans l'histoire des sciences pour une découverte, l'effet photovoltaïque, dont on peut douter que l'on puisse la lui attribuer intégralement. C'est pourtant l'un des seuls points qui a permis qu'il ne tombe pas totalement dans l'oubli. Nous ne souhaitons pas lui retirer ce petit élément de gloire, mais il semble nécessaire de le nuancer. S'il a découvert que l'on pouvait mesurer les effets de la lumière par l'intermédiaire des courants électriques, son objectif n'était pas de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette découverte porte sur l'usage de réactions chimiques, bien loin des phénomènes physiques qui produisent l'effet photovoltaïque que nous connaissons actuellement.

Cinquième partie :

Contexte théorique des concepts utilisés dans ce travail.

Cinquième partie : contexte théorique des concepts utilisés dans ce travail.

Nous présenterons dans cette partie les différents positionnements philosophiques auxquels nous nous référons pour analyser le travail effectué par Edmond Becquerel lors de son étude de la lumière solaire au moyen des réactions photosensibles.

Nous présenterons dans un premier temps les questions posées par ce travail concernant le rôle et la fonction de l'expérience dans l'activité scientifique. Nous étudierons ensuite les problèmes posés par l'activité de réplication que nous avons réalisée. Certains historiens et philosophes des sciences considèrent que l'analyse d'une controverse scientifique peut permettre d'apporter des informations sur l'objet réel du désaccord. Cet objet peut en effet parfois échapper aux protagonistes eux-mêmes. Nous présenterons, enfin, leurs points de vue.

1. Rôles et fonctions de l'expérience dans l'activité scientifique.

1.1. Rôles et fonctions du résultat expérimental.

La physique, et les sciences de la nature d'une manière générale sont une activité en partie fondée sur des preuves expérimentales. Il est donc communément admis que les connaissances scientifiques reposent sur des fondements érigés autour de l'expérience. L'expérience joue plusieurs rôles dans l'activité scientifique. Elle peut être utilisée pour tester des théories et apporter des éléments de preuve. Elle peut même parfois apporter des éléments de réflexion ou d'analyses permettant d'identifier la structure mathématique sous laquelle on peut modéliser le phénomène étudié. Elle peut aussi permettre l'élaboration d'une nouvelle théorie, ou prouver qu'une théorie communément admise présente des imprécisions. Elle peut parfois même permettre d'invalider certains éléments de cette théorie. Dans une pratique purement exploratoire, l'expérience peut permettre de mettre en évidence un phénomène inconnu, et encore inexpliqué. Dans ce cas, le chercheur qui explore un nouveau phénomène peut apporter des éléments qu'une future théorie pourra expliquer. Très souvent une simple expérience peut jouer plusieurs de ces rôles à la fois.

Ces différents rôles parfois simultanés que peut jouer l'expérience, à la fois inspiratrice et validante d'une théorie, peut nous laisser penser que l'élaboration des connaissances

scientifiques est parfois instable et imprécise. Pourtant la communauté scientifique semble considérer qu'elle peut baser le savoir scientifique sur des résultats expérimentaux. Il s'agit donc de se demander comment l'on peut valider les résultats expérimentaux.

1.1.1. Le point de vue de Ian Hacking

Dans son travail intitulé *do we see through a microscope ?*[120], Ian Hacking tente de répondre à la question « comment peut-on croire aux résultats obtenus en utilisant un appareillage expérimental complexe ? ». Il est en effet important de savoir comment on peut distinguer un résultat valide d'un artefact expérimental. Cette question est d'autant plus cruciale, lorsqu'il s'agit d'un appareillage expérimental destiné à explorer un nouveau domaine, comme c'est le cas dans notre étude. Ne connaissant pas l'intégralité des effets qui peuvent survenir ni leurs amplitudes, de quels outils dispose alors l'expérimentateur pour faire la différence entre le résultat produit par l'objet qu'il étudie et un artefact créé par l'appareillage ?

Pour répondre à cette question Hacking émet l'hypothèse que l'utilisation même de l'appareillage est imprégnée de théorie, et que le manipulateur acceptant cette théorie n'observe généralement que les éléments pouvant être expliqués dans celle-ci, cette théorie expliquant généralement, au moment de l'expérimentation, le fonctionnement même de l'appareil utilisé. Le manipulateur intervenant lors de la préparation de l'expérimentation, puis lors de sa réalisation, imprégné de la théorie communément admise, influence, selon Hacking, le résultat même de l'expérimentation. Ce point est d'autant plus important lorsque l'appareillage est complexe, puisqu'il nécessite des interprétations de l'utilisateur aussi bien au niveau de son élaboration qu'au niveau de l'obtention des résultats qu'il produit.

Hacking s'interroge aussi sur la question de la confirmation d'un résultat par la comparaison d'autres résultats obtenus de manière indépendante par des appareillages considérés comme différents. En effet, il est selon lui communément admis qu'obtenir le même résultat avec des systèmes expérimentaux différents permet de s'assurer de la validité de celui-ci. La question selon lui posée par ce point de vue concerne la différence même des systèmes expérimentaux mis en jeu. Cette différence est établie dans un cadre théorique admis. Existe-t-il un moyen, en dehors de tout cadre théorique de s'assurer d'une part que les dispositifs expérimentaux sont différents, d'autre part que les résultats sont réellement les

[120] Hacking, I. (1981). "Do we see through a microscope." Pacific philosophical quarterly **63**: 305-322.

mêmes ? En effet, si l'on peut s'assurer que les deux systèmes sont effectivement différents, et que cela n'implique aucune considération théorique, alors on peut considérer que le résultat est effectivement confirmé. Sinon, selon lui, il faudrait admettre que deux appareillages différents, aux histoires différentes et aux défaillances systématiques différentes, produisent tous deux des artefacts qui coïncident pour donner le même résultat. Ce cas-là peu plausible, serait selon lui une *coïncidence absurde* (preposterous coincidence).

Mais qu'arrive-t-il lorsque l'expérimentateur ne dispose que d'un seul type d'appareil pour explorer un phénomène ? Il doit alors mettre en place différentes stratégies pour valider ses observations.

1.1.2. Les critères de validations d'Alan Franklin

Alan Franklin propose différentes stratégies nécessaires à l'expérimentateur pour valider les observations qu'il obtient avec un appareil[121].

Le premier est la calibration de l'appareil par la reproduction d'un phénomène connu. Cela permet selon lui d'une part de renforcer la confiance que l'on place en l'appareil d'autre part de s'assurer de la précision que l'on peut obtenir à l'aide de celui-ci. Si cette calibration échoue on a alors, selon Alan Franklin, de bonnes raisons de s'interroger sur l'ensemble des résultats obtenus avec cet appareil.

Si ce critère peut avoir l'air très proche de l'analyse de la confirmation expérimentale développée par Ian Hacking elle présente cependant une différence importante dans le sens où le résultat recherché pour la calibration est considéré a priori comme prouvé et donc possible à obtenir avec le nouvel appareillage s'il fonctionne correctement.

Le deuxième outil de validation consiste à produire de manière répétée les artefacts dont on sait par avance qu'ils apparaîtront lors de l'utilisation de l'appareil. Savoir en quoi consistent ces artefacts permettra de les soustraire aux effets mesurés afin de préciser les résultats obtenus.

Cet outil, s'il est idéal pour préciser le mode de fonctionnement d'un appareil, n'est bien sûr que très rarement possible à mettre en œuvre. Il nécessite en effet de connaître de manière très précise les principes théoriques de fonctionnement de l'appareil afin de pouvoir

[121] Franklin, A. (1986). The neglect of experiment. Cambridge, Cambridge university press.

en prévoir à l'avance les artefacts. Ce critère n'est généralement pas applicable lorsque l'expérimentateur utilise un appareillage à des fins exploratoires.

Le troisième critère concerne l'élimination des sources possibles d'erreur et des explications alternatives du résultat. C'est ce qu'Alan Franklin nomme la *stratégie de Sherlock Holmes*. En effet si un scientifique peut prouver qu'il n'y a aucun autre moyen d'expliquer le phénomène qu'il a observé que celui qu'il propose, il pourra probablement faire accepter son résultat comme vraisemblable.

Toutefois il serait nécessaire pour s'assurer dans ce cas-là que le résultat est vrai qu'il n'y aura dans l'avenir aucun autre moyen d'expliquer le phénomène. Cette situation est évidemment impossible. Le résultat ne restera que vraisemblable et ne sera que possiblement accepté.

La stratégie suivante proposée par Alan Franklin consiste en l'utilisation des résultats de l'expérimentation eux-mêmes pour prouver la validité de l'instrumentation. Il s'agit ici de réaliser des modifications mineures dans l'objet d'étude afin de mettre en évidence des modifications elles aussi mineures dans les résultats. Ainsi l'expérimentateur semble pouvoir prouver que les résultats obtenus ne sont pas dus à des artefacts ou des dysfonctionnements de l'appareillage.

La difficulté que présente la mise en place de cette stratégie réside dans le choix que doit faire l'expérimentateur concernant les modifications apportées à l'objet d'études. En effet, ce choix nécessite de s'assurer que l'artefact possible n'est pas dépendant de près ou de loin de la variable étudiée. Cette capacité de juger de l'importance d'un effet supposé de la part de l'expérimentateur nécessite qu'il maîtrise le sens de son dispositif et qu'il maîtrise de manière extrêmement précise son appareillage et les principes de fonctionnement qui expliquent celui-ci. Cela semble nécessiter que l'utilisateur de l'appareil ait défini un mode d'explication de son fonctionnement.

Le cinquième outil de validation consiste en l'utilisation d'une théorie acceptée et indépendante du phénomène étudié pour expliquer les résultats. Dans ce cas-là l'expérimentateur prévoit par l'utilisation de la théorie les résultats que devront produire les appareils. L'accord des observations avec les prédictions théoriques des propriétés étudiées valide alors de lui-même les résultats expérimentaux.

Le problème posé par un tel critère réside dans le fait que les résultats obtenus par

l'expérimentateur sont ceux qu'il attend. Dans une telle situation, la production par l'appareillage de résultats corrects contredisant la théorie risque d'être interprétée comme des artefacts, où des erreurs de manipulation. Cependant ce critère est l'un des plus couramment exploité, selon Franklin, dans la pratique de l'activité scientifique.

Le dernier critère proposé par Franklin est l'utilisation de l'outil statistique comme mode de validation de résultats expérimentaux. Il s'agit alors simplement pour l'expérimentateur de montrer, par la répétition exacte de l'expérience, que les résultats obtenus ont une probabilité de se produire suffisamment grande pour être validés et reconnus comme étant les effets analysés.

Mais ces stratégies de validation de résultats expérimentaux sont développées dans un registre argumentatif. Même si elles ébauchent une épistémologie de l'expérimentation elles n'apportent que de *bonnes raisons*, selon Alan Franklin, de faire confiance aux résultats expérimentaux produits. Aucune de ces stratégies ne peut être considérée comme une preuve de l'exactitude de ceux-ci. Nombreux sont les cas en histoire des sciences ou ces stratégies ont été appliquées mais où plus tard les résultats expérimentaux ont été invalidés. Aucune d'elles, aucune combinaison de celles-ci, ne peut assurer de l'exactitude des résultats obtenus. Les physiciens utilisent ces stratégies dans la mesure où elles sont possibles à mettre en œuvre, afin d'une part de conforter la crédibilité des résultats, d'autre part de persuader la communauté scientifique de celle-ci. En effet comme nous avons tenté de le montrer, chacune de ces stratégies présente un point faible. Il est possible en les associant, de renforcer le discours démontrant la fiabilité d'une expérience ou d'un résultat expérimental, mais en aucun cas de le prouver, au sens strict du terme. Aucune expérience n'est infaillible.

1.1.3. L'élaboration expérimentale chez Peter Galison

Peter Galison dans son livre *How experiments end*[122] élargit la problématique de l'expérience à des situations plus complexes afin de répondre à cette question de la validité du résultat expérimental. La question centrale qu'il pose dans cet ouvrage porte sur le moment où l'expérimentateur considère que son travail expérimental est terminé. C'est à dire le moment où il considère que les résultats obtenus sont validés et fiables. Il cherche les raisons qui

[122] Galison, P. (1987). How experiments end. Chicago, University of Chicago press.

permettent d'arrêter le processus expérimental en considérant qu'il n'apportera aucune nouvelle information précisant les résultats ou les remettant en cause.

Pour réaliser cette étude, il élargit le champ d'observation de l'expérience à l'ensemble d'une communauté scientifique exploitant les résultats et proposant la théorie explicative de ceux-ci. Galison considère que dans une communauté de physiciens exploitant les mêmes résultats expérimentaux, certains membres considéreront une partie de ces résultats comme plus convaincante de la validité d'un point de vue théorique par exemple, alors que d'autres membres négligeront cette partie pour en considérer une autre comme plus fiable. Il attribue ces différences de points de vue d'une même communauté aux particularités inhérentes à chaque tradition expérimentale, différents groupes utilisant différents instruments ou appareils. Malgré ce désaccord, souvent non explicité, concernant les éléments les plus fiables d'une étude expérimentale cette communauté parvient à un accord concernant le cadre théorique qui l'explique. Alors, et sans qu'aucun accord réel sur l'exploitation des résultats expérimentaux soit établi, le champ expérimental est clos, et l'expérience s'arrête.

Galison montre que de grands changements théoriques ne sont pas nécessairement liés, ou du moins pas immédiatement liés, à de grands changements dans la pratique expérimentale ou dans l'instrumentation. Cette persistance du résultat expérimental apporte une continuité à travers les changements conceptuels.

Robert Ackermann développe un point de vue similaire dans son travail sur les instruments scientifiques[123]. Pour lui, un instrument scientifique ne peut pas changer les théories. Les instruments créent un lien invariant entre leurs principes de fonctionnement et le monde réel, dans la mesure où ils sont utilisés correctement. Un changement théorique ne modifie pas le résultat expérimental mais nécessite de redéfinir le sens que l'on donne à l'instrument, et l'interprétation que l'on a de son interaction avec le monde réel. Le résultat expérimental change dans ce cas de signification mais la valeur reste la même, elle doit le rester si elle est fiable.

Galison développe aussi un point de vue concernant l'interaction entre l'expérience et la théorie. Selon lui, la théorie détermine parfois ce que l'on considère comme un fait réel de ce qu'on considérera comme un artefact. Cela est particulièrement sensible lorsque que pour observer un effet l'expérimentateur doit éliminer ce qu'il considère comme un « bruit de

[123] Ackermann, R. (1985). Data, instruments and theory. Princetown, Princetown university press.

fond » qui risque de masquer ce qui est recherché. Le risque est alors d'éliminer un élément permettant de développer un autre registre explicatif que celui utilisé pour l'élimination de parasites.

L'expérimentateur chez Galison est donc en permanence soumis à des a priori théoriques qui interviennent nécessairement à la fois dans la réalisation expérimentale, dans son amélioration et son utilisation, mais aussi dans son achèvement.

Dans ce type de validation, une partie des critères utilisés, semble être dans un registre plus proche de préoccupations d'ordre purement scientifique, c'est-à-dire dans le registre de la preuve scientifique. Mais il s'agit pourtant, comme chez Franklin, de persuader une communauté par un discours argumentatif, plutôt que de prouver scientifiquement l'exactitude des résultats expérimentaux. Cependant, pour Galison comme pour Franklin, la pratique d'une activité scientifique présente des spécificités qui nécessitent de la considérer comme une activité particulière. D'autres épistémologues considèrent que l'activité scientifique, comme n'importe quelle autre activité professionnelle, est basée uniquement sur ce registre de persuasion.

1.1.4. Collins, ou la régression de l'expérimentateur

Collins[124] s'oppose à l'idée que l'acceptation par les communautés scientifiques de résultats expérimentaux se fait sur la base d'arguments épistémologiques. Selon lui, il n'existe aucune dimension épistémologique à la validation d'un résultat expérimental, ou d'une preuve. En effet il considère que ce que les scientifiques acceptent comme un résultat expérimental correct est obtenu avec un appareillage expérimental qui fonctionne bien, et qui est validé. Mais un appareillage expérimental qui fonctionne bien est validé, selon lui, parce qu'il donne des résultats expérimentaux corrects. C'est ce qu'il nomme le cercle vicieux de l'expérimentateur (experimenters' regress). Il n'y a donc aucun critère scientifique ou épistémologique pour décider si une expérience ou un appareil fonctionne correctement. Il revient en particulier sur le critère de calibration de l'appareil développé par Franklin, en affirmant que l'étalonnage ne peut jamais être fait avec une grandeur indépendante. Cette indépendance selon lui ne peut exister, la grandeur est nécessairement liée à un moment ou à

[124] Collins, H. M. (1992). Changing order, replication and induction in scientific practice. Chicago, University of Chicago press.

un autre à la construction même de l'appareil.

Ce cercle vicieux ne peut être brisé que par la négociation au sein de la communauté scientifique concernée, sur des arguments de dimension purement sociale tels que l'ambition, l'intérêt professionnel ou scientifique. Aucun élément de ces négociations ne peut, selon lui, être classé comme un critère épistémologique ou un jugement raisonné. Ceci amène Collins à douter d'une manière générale de toute preuve expérimentale, toute hypothèse, toute théorie.

Mais il est des cas où ce cercle vicieux n'est pas présent. C'est le cas en particulier, lorsqu'il y a débat ou controverse entre deux scientifiques ou deux communautés scientifiques, s'opposant sur l'existence même d'un phénomène. C'est aussi le cas lorsque le résultat est obtenu avec un appareil au fonctionnement nouveau, qu'il est impossible de calibrer. Dans ce cas-là il n'est effectivement pas possible de mettre en évidence ce type de phénomène. Cependant selon Collins, les outils de décision et de choix ne sont pas pour autant d'ordres théoriques ou épistémologiques. Il s'agit toujours, pour permettre la validation d'un point de vue aux dépens des autres dans le cas de la controverse, de l'utilisation d'arguments d'ordres sociaux. De même pour un instrument au fonctionnement nouveau, les seuls moyens de justifier de son exactitude et de sa validité sont des arguments de reconnaissance sociale, d'autorité, de pouvoir, ou d'influence.

Que l'on soit dans le cas du cercle vicieux ou dans un cas où il ne s'applique pas, Collins considère que des justifications d'ordre scientifique et épistémologique utilisées dans les publications ou les débats ne sont produites qu'a posteriori, respectant ainsi l'image que la communauté souhaite donner de sa pratique scientifique. Ces arguments, selon lui, ne jouent pas réellement un rôle dans le débat, qui se déroule de manière souvent implicite, en utilisant les outils argumentatifs présentés plus haut.

Alan Franklin refuse ce point de vue radicalement relativiste et s'oppose à Collins. Il considère que l'activité scientifique présente la particularité, par rapport à d'autres domaines d'activité professionnelle, d'appuyer ses choix théoriques sur des jugements raisonnés. Sans que l'on puisse nécessairement identifier l'utilisation explicite de règles formelles, il affirme que les procédures de validation ou de rejet d'une expérience, d'un résultat expérimental, ou d'une théorie, repose au moins en partie sur des raisonnements logiques et construits. Ceux-ci entrent dans les discussions et les controverses, et participent, dans une dimension non négligeable, aux choix scientifiques.

1.1.5. Pickering ou l'opportunisme

Pickering[125] propose d'autres raisons permettant de justifier l'acceptation de résultats. L'une des principales concerne l'utilité future d'un résultat, qu'il soit théorique ou expérimental, pour la communauté scientifique. Il existe selon lui un critère d'efficacité future qu'une communauté scientifique peut reconnaître dans un nouveau résultat ou une nouvelle théorie qui, même s'il n'est pas explicité, peut permettre à celle-ci d'envisager sous un angle nouveau des questions encore non résolues.

Concernant plus spécifiquement les résultats expérimentaux, Pickering développe l'idée qu'un appareillage expérimental est rarement capable dans un premier temps de produire des résultats fiables. Il nécessite avant cela de nombreux réglages et étalonnages nécessaires à son bon fonctionnement. À ce moment-là, interviennent souvent à la fois la théorie du fonctionnement de l'appareil si elle existe, et la théorie même du phénomène. Celles-ci participent alors parfois à la production du résultat expérimental. Cette phase d'adaptation et de réglage est donc soumise aux attentes et aux besoins d'une communauté, qui peut influencer les choix expérimentaux en fonction des objectifs souhaités. Un appareil, ou un instrument, est donc dans sa phase d'élaboration un outil malléable.

Il est nécessaire selon lui, lorsque l'on analyse la fabrication ou l'invention d'un nouvel instrument, de rechercher quelles peuvent être les attentes de la communauté, concernant cet appareil, ainsi que l'arrière plan théorique, s'il existe, qui motive sa construction.

Il développe en effet l'idée qu'il existe nécessairement une interaction forte entre l'expérimentateur, son appareillage et le monde réel. Le résultat de l'expérimentation, lorsqu'il est considéré comme validé, peut être vu comme un compromis savant, ou un accord mutuel, obtenu par approximations successives, entre l'appareillage, la théorie de l'appareillage, et la théorie expliquant le phénomène. L'activité scientifique, et en particulier le travail expérimental, consiste alors en une négociation entre la connaissance scientifique et le monde matériel qui est son objet d'étude.

De nouveau, nous pouvons lui opposer le point de vue d'Alan Franklin qui insiste sur le fait que l'activité scientifique présente la particularité de s'intéresser au monde réel, et que de ce point de vue, un des éléments centraux dans la validation ou le rejet d'une théorie ou d'un résultat expérimental est l'adéquation avec les phénomènes présents dans ce monde. De

[125] Pickering, A. (1989). Living in the material world. The use of experiment, studies in the natural sciences . T. P. a. S. S. David Gooding. Cambridge, Cambridge university press**:** 275-298.

plus, contrairement à ce que semble affirmer Pickering, les ajustements effectués sont souvent justifiés par les critères épistémologiques développés par Franklin.

Il n'est pas ici question pour nous de nous prononcer sur le débat qui oppose les philosophes constructivistes tels que Collins ou Pickering, aux rationalistes tels qu'Alan Franklin. Toutefois, il semble important de noter que l'exercice de l'activité scientifique présente des particularités de rationalité et de concordance avec le monde réel qui lui confère une dimension particulière. En cela il semble difficile d'accepter que les validations et réfutations ne soient appuyées que sur des dimensions sociales. Nous pensons que les particularités de l'activité scientifique en font un domaine dans lequel d'autres critères, tels que la cohérence avec le monde réel, entrent en jeu. La définition de cette cohérence n'est pas clairement définie par Franklin. Il la justifie par la pratique expérimentale au sein du laboratoire. Le physicien qui réalise ses investigations cherche à traduire un accord entre ses travaux et le monde réel, sans pouvoir toujours être en mesure de préciser en quoi consiste cet accord.

1.1.6. L'intervention de Hacking

Afin d'éclairer ce débat entre rationalistes et constructivistes, Hacking[126] met en évidence un point central qui oppose ces deux courants de pensée. Il le nomme contingence (contingency). C'est l'idée, développée par les constructivistes, que la science n'est pas très déterminée. C'est-à-dire que le développement de la science passée aurait pu se dérouler autrement. Un point de vue modéré de cette idée serait de dire que les modèles choisis au cours de l'histoire auraient pu être différents, et expliquer de la même manière les phénomènes observés. Un point de vue radical, tel celui développé par Collins, consiste à dire que la science telle qu'elle est, et les connaissances scientifiques actuelles, n'existent que du fait du choix des scientifiques qui les ont construites. Elles auraient pu être construites de manière totalement différentes sans pour autant que la communauté ressente plus de décalage entre ses connaissances et le monde réel. La science telle qu'elle est ne serait alors pas construite par une évolution de la compréhension du monde mais par des choix basés essentiellement sur des critères sociétaux.

Alan Franklin, dans le courant rationaliste, accepte l'idée qu'un modèle puisse

[126] Hacking, I. (1999). The social constructionof what? Cambridge, Cambridge university press.

naturellement en remplacer un autre, et facilement expliquer différemment les mêmes phénomènes. Cependant, il reste attaché à l'idée que la science et en particulier la physique, a ceci de particulier qu'elle se doit de construire une relation rationnelle entre ses modèles et le monde physique. Il est certaines grandeurs, telle la vitesse de la lumière, qui doivent être expliquées, et prises en compte, quel que soit le modèle utilisé. Il ne s'agit pas pour autant, comme certains l'affirment, de considérer notre système d'explication du monde comme le seul possible. Ce point de vue que Franklin nomme « inévitabiliste », considère que les lois physiques étant immuables et vraies, s'il existe d'autres formes de vie dans l'univers, elles ont nécessairement développé les mêmes lois et mêmes théories. La physique terrestre serait alors un langage universel.

Le désaccord entre rationalistes et constructivistes ne réside donc pas dans le fait qu'il ne peut y avoir différentes alternatives d'explication, mais sur les raisons qui permettent de choisir entre ces alternatives. Quand Collins pense que ces raisons sont essentiellement sociétales, Franklin y voit essentiellement des arguments épistémologiques.

La question ici n'est pas pour nous de choisir entre ces différents courants. Quand les constructivistes défendent l'idée qu'aucun des arguments épistémologiques prétendus décisifs n'a en réalité réellement de poids dans les choix effectués, et sont des façades pour masquer des arguments d'intérêt personnel et social des scientifiques, les rationalistes défendent l'idée que l'activité scientifique a cette particularité de nécessiter, en plus, des arguments épistémologiques.

Cependant, le mouvement rationaliste développé par Franklin, accepte les réflexions constructivistes, et accepte donc qu'une partie des critères de choix soit d'ordres sociaux, alors que ses opposants refusent catégoriquement l'existence même de critères épistémologiques valides.

1.2. Rôles et fonctions de l'expérience dans l'activité scientifique

Le rôle de l'expérience dans l'activité scientifique est généralement déterminé par sa relation avec la théorie. Cette relation peut être déclinée sous plusieurs angles : elle peut être absente, elle peut servir à confirmer, réfuter une théorie, ou permettre d'élargir et compléter celle-ci.

1.2.1. L'expérience détachée de la théorie

Hacking[127] montre que souvent l'expérience est totalement indépendante d'une quelconque théorie. Elle peut dans ce cas, justifier elle-même de sa propre existence. L'expérimentateur n'a alors aucune théorie expliquant le phénomène étudié. Lorsqu'il s'agit d'une expérience exploratoire destinée à rechercher un phénomène inconnu, il n'a même aucune idée parfois du phénomène lui-même. L'expérimentateur ne dispose pas d'un grand nombre de moyens pour décider dans quelle voie poursuivre ses investigations expérimentales. Mac Kinney[128] identifie comme principaux critères de choix d'une part les moyens financiers et matériels dont dispose l'expérimentateur, d'autre part ses compétences dans l'utilisation de ce matériel. L'orientation de l'investigation est alors essentiellement déterminée par les compétences particulières de l'expérimentateur, ses compétences étant déterminées par ses intérêts propres.

On peut rapprocher ce point de vue de ce que Franklin nomme le recyclage de l'expertise (recycling of expertise), ou de ce que Galison nomme la tradition expérimentale. Cependant, le travail de Mac Kinney offre la possibilité d'intégrer, en plus des compétences spécifiquement liées à l'activité scientifique, des compétences provenant d'autres domaines, techniques ou artistiques par exemple.

Cela ne signifie pas que l'expérience se passe définitivement de théorie, mais qu'elle peut la précéder. Hacking affirme cependant que la découverte de n'importe quel phénomène inexpliqué appelle une explication théorique. Il faut nuancer ce propos, en séparant la découverte du phénomène, de l'expérimentateur qui l'a mis en évidence. Si la découverte d'un nouveau phénomène appelle une théorie explicative, l'expérimentateur n'en ressent pas forcément le besoin. Tout expérimentateur n'exige pas nécessairement une théorie explicative à chacun des phénomènes qu'il identifie.

---

[127] Ibid.

[128] Mc Kinney, W. (1992). "Pausibility and experiment:Investigations in the context of pursuit." History and phlosophy of science.

1.2.2. L'expérience comme confirmation ou réfutation d'une théorie

L'expérience peut aussi jouer ce rôle de confirmation ou de réfutation d'une théorie, ou permettre l'identification de la structure mathématique de celle-ci.

Lorsqu'elle joue le rôle de confirmation, l'expérience peut être une expérience cruciale. C'est-à-dire qu'elle est spécialement construite et réalisée pour que son résultat permette de décider entre deux théories laquelle est vérifiée et l'autre invalidée. Elle peut aussi servir à éliminer, dans le cas où plusieurs explications sont en concurrence, une à une chacune des explications invalides, et ainsi, confirmer par élimination de la dernière restante. Elle peut enfin confirmer par ses résultats une théorie communément admise avant même que l'expérience ne soit réalisée.

Lorsqu'elle joue le rôle de réfutation elle peut, comme nous l'avons dit précédemment, réfuter des théories concurrentes afin d'appuyer la seule expliquant le résultat de l'expérience. Elle peut aussi jouer le simple rôle d'outil d'invalidation d'une théorie. C'est dans ce seul rôle que Popper considère le résultat expérimental comme une preuve. En effet selon Popper[129] jamais un résultat expérimental ne permet de prouver une théorie, par contre, selon son principe de réfutation, un seul résultat s'y opposant suffit à l'invalider. Franklin est en désaccord avec ce principe d'une part parce qu'il considère qu'il est possible, contrairement à Popper, qu'une expérience existe sans arrière-plan théorique, d'autre part parce que l'élaboration de la théorie et l'élaboration de l'expérience se font de manière suffisamment distincte pour que le résultat expérimental ne remette pas immédiatement en cause le cadre théorique. De plus, la réfutation par un résultat expérimental d'une théorie nécessite que la construction de l'appareil, l'élaboration de la théorie l'expliquant et la théorie expliquant le phénomène soient suffisamment liées, et que ce lien soit suffisamment stable pour qu'un résultat suffise à remonter toute la chaîne théorique. Comme nous l'avons vu précédemment, il peut y avoir différentes raisons pour lesquelles un résultat expérimental ne conduit pas à la validation de la théorie, et il peut y avoir différents registres argumentatifs utilisant différemment le résultat de l'expérience.

Le contexte permettant la réfutation d'une théorie par une expérience est donc extrêmement précis, la réfutation expérimentale est donc extrêmement rarement possible.

L'expérience peut aussi permettre de confirmer une théorie communément admise,

[129] Popper, K. (1973). Logique de la découverte scientifique. Paris, Payot.

dont la mise en évidence expérimentale n'était pas encore technologiquement possible. Sa réalisation et son résultat permettent alors simplement d'apporter un nouvel argument justifiant l'efficacité et l'intérêt de la théorie. Dans ce cas l'expérience étant construite dans un cadre théorique donné, afin d'obtenir un résultat attendu, les remarques et critiques de Collins semblent particulièrement justifiées. En effet construire un appareillage afin de réaliser une expérience dont le résultat est attendu place celle-ci dans un rôle argumentatif d'ordre social plutôt qu'épistémologique. Dans ce cas là est-il possible d'obtenir un résultat contredisant cette théorie ? Si cela se produit, comment interpréter ce résultat ? Ne sera-t-il pas simplement identifié comme un artefact ou une erreur inexpliquée ?

1.2.3. Complexification de la relation expérience théorie

Enfin l'expérience peut permettre de développer, d'élargir une théorie établie. Contrairement aux cas précédemment décrits, où l'expérience donne un résultat univoque concernant la théorie, ici l'expérience permet parfois l'exploration des limites ou des élargissements de la théorie, et donc de la développer dans diverses directions.

En effet, la relation expérience-théorie n'est que très rarement aussi simple. Il peut arriver qu'une expérience soit en contradiction avec la théorie admise sans qu'il soit possible de trouver d'artefact ou de failles permettant de considérer le résultat expérimental comme faux. Une expérience risque alors de mettre en péril l'édifice théorique. L'histoire des sciences montre qu'elle ne joue pourtant pas le rôle de réfutation prévue par Popper. Elle peut être négligée si les développements futurs qu'elle permet d'apporter n'intéressent pas directement la communauté. Elle peut aussi permettre l'adaptation de la théorie pour englober ce résultat. Elle peut simplement amener le théoricien à définir de nouvelles limites à l'efficacité de sa théorie. La communauté peut simplement décider que l'appareil ne satisfait pas aux conditions requises par la théorie.

Il est pourtant difficile de considérer que l'expérience a raison et que la théorie a tort, en se basant sur un seul appareillage expérimental. Mais, si l'on considère que l'expérience est correcte, elle peut permettre d'ouvrir de nouvelles pistes, d'établir de nouveaux procédés expérimentaux permettant de tester cette relation expérience-théorie dans le cas particulier où ces deux pôles entrent en conflit.

Nous avons essayé de présenter ici les divers aspects du rôle et de la fonction de l'expérience et du résultat expérimental dont nous avons besoin pour notre étude. Nous

n'avons bien sûr pas réalisé une étude exhaustive de ces différents points. Nous avons simplement souhaité présenter les différents courants qui nous semblent efficaces pour l'analyse des expériences réalisées par Edmond Becquerel, étudiées dans ce travail. Nous avons montré qu'il existe différents points de vue concernant l'acceptation de résultats expérimentaux. Celle-ci peut être basée sur des arguments épistémologiques pour certains, pour d'autres sur une utilité future, des intérêts sociaux, des accords au sein d'une communauté particulière. Quoi qu'il en soit tous ces courants acceptent, quel qu'en soit la raison, l'existence d'un consensus possible autour des résultats expérimentaux.

La spécificité des expériences réalisées par Edmond Becquerel réside dans le fait qu'elles nécessitent la construction d'instruments d'investigation, qui en se stabilisant dans leur structure et leur fonctionnement deviendront des appareils d'analyse. La principale question posée par l'analyse de la construction de ces appareils concerne leurs relations, si elles existent, avec un cadre théorique, stabilisé ou non.

2. Rôles et fonctions de l'expérience dans le travail d'Edmond Becquerel

Edmond Becquerel a une formation à la recherche et à la pratique de la physique tout à fait particulière. Héritée de son père qui l'a formé à l'exercice d'une physique essentiellement expérimentale, sa pratique est essentiellement basée sur l'investigation expérimentale, l'apport de résultats précis nombreux et reproductibles, se gardant autant que possible de l'usage de théories lorsque cela ne s'avère pas utile. Il revendique le droit de réaliser des expériences totalement détachées du cadre théorique expliquant les phénomènes étudiés. L'analyse de la lumière et des effets qu'elle produit sur la matière en est un exemple frappant.

Les différents appareils, que nous présentons et analysons dans ce travail, sont construits sans qu'il soit fait appel explicitement à l'une ou l'autre des théories de la lumière débattues à l'époque, sans qu'il soit proposé de théories expliquant le fonctionnement même des appareils construits pour réaliser les expériences. Les publications rédigées par Edmond Becquerel à cette époque sont centrées sur la réalisation expérimentale, insistant sur la rigueur de manipulation, se dispensant complètement d'arrière plan théorique.

Cependant, les trois principaux appareils que nous étudierons dans ce travail, permettant trois séries d'expériences différentes, ne peuvent pas être classés ensemble dans une seule et même catégorie rappelant la catégorie, présentée plus haut, des expériences détachées de toute théorie.

2.1. Le premier appareil à deux phases

Le premier appareil que Becquerel construit, que nous appelons appareil à deux phases, joue un rôle d'investigation. Il a pour but de permettre l'identification d'un phénomène particulier, celui qui produit des effets, sous l'influence de la lumière, sur la matière. Ces effets ne sont alors pas identifiés, et la manière dont ils sont produits est inconnue. L'appareil a donc dans ce cas le statut d'instrument d'investigation détaché de la théorie. Il l'est pour plusieurs raisons. D'une part parce qu'il n'existe pas de théorie explicative du phénomène étudié ou du fonctionnement même de l'appareil, d'autre part par choix méthodologique et épistémologique de l'expérimentateur lui-même. Cet instrument pose pourtant, comme nous le développons dans ce travail, des questions théoriques qui nécessitent l'élargissement des cadres établis.

Le travail de validation des résultats de cet appareil, n'est donc pas possible par l'accord avec une théorie préétablie, ou avec d'autres résultats déjà validés. Il est donc impossible pour cet appareil d'appliquer les critères de Ian Hacking. La démarche que choisira Edmond Becquerel, sous l'influence de Jean-Baptiste Biot, se rapproche des troisième et quatrième stratégies proposées par Franklin. En effet, il cherchera par différents moyens à éliminer les sources possibles d'erreur et d'artefact, pour s'assurer que ce qu'il mesure est bien délimité, et n'est produit que par le phénomène qu'il explore. Il réalisera aussi des modifications mineures de l'appareillage, ajoutant des filtres, changeant les substances analysées, afin de mettre en évidence que les changements de l'appareillage produisent des modifications dans les résultats qu'il n'est pas possible d'interpréter comme des artefacts.

Cependant, ces deux stratégies, appliquées sur ce premier appareil, ne suffiront pas à convaincre son principal détracteur, Jean-Baptiste Biot, et nécessiteront le développement d'un second appareil dont la fonction initiale peut être interprétée comme permettant de poursuivre l'application de la troisième stratégie proposée par Franklin, c'est-à-dire l'élimination des erreurs possibles et des artefacts.

2.2. Le second appareil : mise en place d'un procédé différentiel

Pour éliminer une cause possible d'erreur, la superposition de l'effet recherché avec un effet parasite produit par les plaques de platine intervenant dans le montage, Edmond Becquerel construit un nouvel appareil basé sur un procédé différentiel. Grâce à cet appareil il

parviendra à montrer que la cause d'erreur supposée, des effets provoqués par la lumière sur le métal nu, n'existait pas ou du moins ne pouvait pas intervenir dans l'appareil précédent.

Cette démarche, consistant à construire un nouvel appareil et donc à imaginer un nouveau fonctionnement, pour préciser l'efficacité ou la validité de l'appareil précédent pose problème. En effet, si l'on accepte le résultat obtenu avec ce nouvel appareil, ce que fera Biot, on améliore effectivement la définition du premier. Mais pour accepter ce résultat comme valide, il faudrait d'abord avoir suffisamment d'éléments permettant la validation du deuxième appareil.

On peut alors s'étonner que Biot, refusant la validation du premier, accepte les résultats du deuxième, non validé, comme moyen d'éliminer une source possible d'artefacts de l'appareil à deux phases. En réalité, il semble que le choix d'un dispositif différentiel, ainsi que sa réalisation et son fonctionnement, soient admis comme une solution efficace pour mettre en évidence l'absence d'un phénomène sous une influence donnée. Car il s'agit ici pour Edmond Becquerel de montrer que lorsqu'une plaque de platine est exposée à la lumière, elle ne produit pas d'effet électrique. Le procédé différentiel présente l'avantage, pour peu que l'on ait soin de ne faire varier qu'un seul des paramètres, ici l'éclairement, et sur un seul des éléments à la fois, ici une seule plaque, de ne pas mettre en évidence les artefacts dans la mesure où ils se produisent sur les deux éléments à la fois, et donc s'annulent. Le seul paramètre qui peut alors produire une variation est le paramètre que l'on décide de changer. Il semble que cet argument soit considéré comme recevable pour Jean-Baptiste Biot, expérimentateur chevronné, puisqu'il n'interrogera pas la validité du montage du point de vue de son principe de fonctionnement. Ce procédé différentiel, déjà employé par César Becquerel lors de la construction de son galvanomètre, permet d'utiliser l'appareil, lors de la recherche de l'absence d'effet, comme un « indicateur » au sens de Biot.

On voit alors effectivement apparaître dans la procédure implicite de validation de cet appareil une partie des idées développées par Collins, puisqu'il est probable que l'absence de discussion concernant cet appareil soit due à l'acceptation de ses principes de fonctionnement par la communauté. Cependant, il est probable que cette acceptation même prenne en compte des arguments purement scientifiques. En effet, il faut pour cela accepter que les artefacts soient reproductibles, pour qu'ils se produisent sur les deux plaques de manière identique. Il faut de plus accepter que leurs apparitions simultanées sur les deux plaques permettent leur annulation mutuelle. Ces deux points semblent être principalement possibles à discuter sur le registre scientifique. Il faut donc aussi, pour comprendre la validation des résultats de cet appareil, prendre en compte les réflexions d'Alan Franklin.

Les expériences menées avec cet appareil ont donc elles aussi un but exploratoire, mais cette fois il ne s'agit pas d'explorer un effet, mais de mettre en évidence l'absence de celui-ci. Ici intervient de nouveau le point de vue de Collins. En effet, comme nous le détaillons dans la partie descriptive des expériences menées par Edmond Becquerel, la première série d'analyses réalisées avec cet appareil ne conduit pas à une conclusion définitive permettant d'affirmer l'absence d'effet provoqué par la lumière sur le métal nu. Cependant, Edmond Becquerel reproduit une nouvelle fois ses manipulations, en nettoyant ses plaques à l'acide puis en les chauffant au rouge. Cette fois, les résultats de l'expérience lui permettent d'affirmer qu'aucun effet parasite n'était provoqué par les plaques elles-mêmes.

La question que pose cette deuxième série d'expériences porte sur les raisons qui ont amené Edmond Becquerel à décider d'une part de réaliser cette deuxième série avec des plaques nettoyées et décapées, d'autre part sur les arguments qu'il peut développer pour affirmer que cette deuxième série d'expériences est plus valide et concluante que la première. Nous pouvons interpréter ses choix expérimentaux, et ses choix de validation comme reflétant l'existence d'une tradition expérimentale, dans le modèle développé par Peter Galison, non seulement présente dans la pratique d'Edmond Becquerel, mais aussi probablement partagée par Jean-Baptiste Biot, puisqu'il accepte ce résultat comme valide et probant. Cette tradition expérimentale, que César Becquerel souhaite transmettre à son fils, a donc probablement un champ de partage plus large, même présent chez certains membres de l'ancienne société d'Arcueil, puisque Jean-Baptiste Biot, bien qu'expérimentateur de talent, est reconnu à l'époque comme un physicien très attaché à l'explication théorique des phénomènes.

À aucun moment, Jean-Baptiste Biot, pourtant contradicteur assidu d'Edmond Becquerel, n'émet de réserve sur l'action même du nettoyage des plaques. Or, on peut envisager que le nettoyage à l'acide provoque des modifications chimiques de surface, et que le chauffage au rouge, provoque des modifications de structure du métal. Ces éléments ne sont pourtant pas soulevés par Biot. Nous pouvons donc imaginer que ce travail de nettoyage, courant à l'époque, ne présente pas pour lui de risque d'introduction de nouveaux artefacts. Il s'agit donc probablement de l'application stricte de méthodes couramment employées qui ne présentent pas de difficultés. La modification de l'appareil, par le nettoyage des plaques, puisqu'il s'agit bien d'introduire un changement dans l'appareil qui introduit un changement dans les résultats, n'éveille pas l'opposition de Biot parce que cette modification correspond probablement à l'application de procédés traditionnels dans la pratique scientifique de la communauté de l'époque.

Par contre, lorsqu'Edmond Becquerel recouvrira ses plaques de substances photosensibles, Jean-Baptiste Biot s'opposera en affirmant qu'il s'agit là d'introduire un nouvel élément dans le système expérimental. Pourtant il peut paraître difficile de voir une différence fondamentale entre la première modification et celle-ci. L'une des explications est alors que l'utilisation de plaques recouvertes d'une couche de substances réactives n'est pas à l'époque courante. Cette méthode provient en effet en grande partie d'un domaine qui en 1839 n'est pas encore maîtrisé par la communauté scientifique, le daguerréotype.

En effet, la modification de ce deuxième appareil par Edmond Becquerel, puis sa fabrication et son utilisation présentent la particularité d'utiliser des procédés spécifiques issus de la daguerréotypie. Cette technique, qui apparaît seulement, n'est pas maîtrisée par les scientifiques. La daguerréotypie intéresse la communauté scientifique, mais l'intégration de ses procédés dans la réalisation d'expériences d'investigation peut poser des interrogations nouvelles. Nous pouvons, pour comprendre la construction de cet appareil, utiliser les conceptions développées par Mc Kinney, concernant les moyens dont dispose l'expérimentateur pour construire un instrument d'expérimentation. En effet, Edmond Becquerel maîtrise la daguerréotypie en amateur à cette époque. Il cherche un moyen d'identifier les effets que produit la lumière sur la matière. Il emploie donc, comme le développe Mc Kinney, les outils, et les compétences dont il dispose pour atteindre son objectif. Cette réalisation peut être vue comme le fruit, selon Mc Kinney, de la limitation des voies d'investigation possible pour l'expérimentateur. Il met en œuvre le seul outil dont il dispose.

Il faut cependant mettre une nuance à cette position, pour le cas qui nous concerne. Edmond Becquerel utilise effectivement les compétences dont il dispose pour réaliser ce nouvel appareil. Mais d'une part, ces compétences sont d'ordre purement technique à l'époque, puisqu'il n'existe aucune théorie explicative de la daguerréotypie. Il s'agit donc ici de mettre en contact deux domaines encore parfaitement distincts, en les associant pour répondre à une question spécifique. D'autre part, l'utilisation que fait Edmond Becquerel des procédés issus de la photographie sont tout à fait particuliers. Il n'y a en effet aucune formation d'image. L'effet utilisé est la production de courant lors de la réaction photosensible. Cette modification, on pourrait parler de détournement, de ces procédés, complexifie considérablement le point de vue de Mc Kinney. En effet, comme nous le présentons dans l'analyse du contenu théorique de ces travaux, ce détournement nécessite l'utilisation de théories de l'électrochimie et d'hypothèses de linéarité entre les effets produits par la lumière et les courants produits dans les réactions photosensibles. Il ne s'agit donc pas

uniquement ici d'utiliser les compétences spécifiques nécessaires à l'expérimentateur, mais de construire une série d'hypothèses, permettant de rendre ces compétences fonctionnelles pour l'objectif visé.

2.3. l'actinomètre électrochimique

Edmond Becquerel imagine, obtenant des résultats mesurables avec des plaques non décapées alors qu'il n'en obtient plus lorsque les plaques sont décapées et chauffées au rouge, qu'il pourrait recouvrir ses plaques propres d'une couche de substances réactives à la lumière, telles que celles utilisées pour les daguerréotypes. Il fait ainsi le lien entre des plaques métalliques recouvertes d'une fine couche d'impuretés qui provoquent des effets électriques, et des plaques recouvertes d'une fine couche de substances photosensibles. Cette modification de l'appareil, agit sur son principe de fonctionnement, mais aussi sur l'objet d'étude puisque la substance photosensible devient le détecteur, permettant de réaliser une analyse de la lumière solaire. Alors qu'auparavant, le premier appareil à deux phases était destiné à l'analyse de la réaction photochimique sous l'effet de la lumière.

Il n'est bien sûr pas question dans le travail d'Edmond Becquerel d'élaboration d'explications théoriques concernant l'appareil en lui-même ou le phénomène étudié. Toutefois le fait qu'une modification de l'expérimentation agisse sur l'objet d'étude lui-même en le modifiant, rappelle sous un angle différent l'idée développée par Galison d'une influence de l'appareil lui-même sur ce qu'il doit montrer. Ici l'appareil ne modifie pas la théorie, puisqu'elle n'est pas établie et n'est pas un objectif de l'expérimentateur, mais il modifie lui-même sa propre fonction. De plus, la lumière solaire étant un domaine de recherche de nouveau, sous l'angle analysé par Edmond Becquerel c'est-à-dire ses effets chimiques, la relation qui existe entre le monde réel et le fonctionnement de l'appareil n'est pas maîtrisée. Ce sont les résultats mêmes de l'instrument qui permettront de définir cette relation. Les choix de l'expérimentateur lors de l'élaboration et des réglages sont donc essentiels et déterminent la direction dans laquelle elle se construit. On peut donc y voir une phase de négociation, au sens de Pickering, entre ces trois éléments, afin de générer un schéma explicatif liant le fonctionnement de l'appareil au phénomène étudié. Cependant, la démarche scientifique d'Edmond Becquerel, associé au souci de rigueur expérimentale de Jean-Baptiste Biot, ancre très fortement l'utilisation de l'actinomètre électrochimique dans le monde réel. Cette étape de négociation doit donc être nuancée comme le fait Alan Franklin par l'insistance qu'ont ces deux chercheurs à conserver ce lien étroit entre une explication possible du phénomène et du

fonctionnement de l'appareil et la réalité de ce phénomène.

La principale difficulté réside dans le fait que cet appareil repose dans son élaboration sur plusieurs hypothèses. Les seules preuves permettant de les valider sont justement le bon fonctionnement de celui-ci. L'hypothèse la plus lourde, qui consiste à considérer que la quantité de substance qui réagit lors de la réaction photochimique est proportionnelle à la quantité de lumière reçue par cette substance, ne peut en effet être testée à l'époque que par l'utilisation de l'actinomètre électrochimique. Cet appareil n'est pourtant pas utilisé dans cette fonction. C'est son bon fonctionnement dans l'analyse de la lumière solaire, qui peut permettre en retour de valider cette hypothèse. Déterminer que ce fonctionnement est bon nécessite donc de développer des stratégies de validation spécifique. Edmond Becquerel considérera que l'actinomètre électrochimique fonctionne, et donc que l'hypothèse décrite plus haut est validée lorsqu'il parviendra à obtenir la mesure de plus de 500 raies sombres dans le spectre visible, que Fraunhofer avait identifiées plus de 20 ans auparavant par l'analyse visuelle directe. Edmond Becquerel applique donc pour la validation de son appareil la première stratégie proposée par Alan Franklin concernant la confirmation du bon fonctionnement de l'appareil par un résultat connu et validé. Mais cette confirmation ne sert pas, contrairement à ce que propose Alan Franklin, à la calibration puisqu'elle intervient a posteriori, et ne permet pas d'attribuer de grandeur définie aux résultats obtenus précédemment. Ce sont en réalité les résultats mêmes de l'appareil qui le valident. Ce procédé utilisé par Edmond Becquerel est donc un couplage complexe de deux méthodes de validation développées par Franklin. Le cas étudié ne nécessite pas seulement comme cela est proposé par cet auteur, l'application de plusieurs des stratégies de validation qu'il identifie, mais l'interaction de celles-ci.

L'opposition que pourrait permettre d'émettre les théories de Collins sur la validation d'un instrument par la confirmation de résultats obtenus différemment semble ne pas pouvoir s'appliquer ici. En effet Edmond Becquerel se positionne comme un expérimentateur ne cherchant pas à établir de théorie, et Fraunhofer n'a jamais cherché à expliquer l'existence des raies sombres qu'il avait découvertes. On ne peut donc pas y voir l'influence du contexte théorique. Cette confirmation est pour Edmond Becquerel fiable, parce qu'il considère que le résultat obtenu ne nécessite pas l'intervention d'une justification théorique, elle concerne directement le monde réel. Elle est obtenue selon lui par un procédé complètement différent de celui qui avait permis à Fraunhofer de mettre en évidence le phénomène, puisque l'identification de Fraunhofer utilisait l'œil humain comme détecteur. Le détecteur est ici la substance photosensible.

Cette question est d'autant plus centrale dans l'analyse de cet instrument que les

principaux résultats qu'il permettra d'apporter, l'existence de raies de Fraunhofer dans la zone au-delà du violet, mettent en évidence dans une autre zone spectrale le phénomène qui a permis la validation d'un instrument. Il est donc indispensable que ce processus de validation soit reconnu par la communauté scientifique de l'époque.

Il faut malgré tout modérer ce rattachement à la réalité concrète comme moyen de validation. Le contexte social et scientifique français de l'époque jouent un rôle important dans l'acceptation des résultats apportés par l'actinomètre électrochimique. D'une part l'apparition et la diffusion rapide de la photographie et l'intérêt que porte la communauté scientifique donnent une importance considérable aux travaux concernant la chimie des substances photosensibles. La société scientifique française, sous l'influence de François Arago secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et promoteur de la photographie, attend des résultats importants des travaux développés sur ce sujet. En particulier les recherches qui peuvent permettre d'expliquer les principes de la photographie et d'en améliorer les procédés sont soutenues. Cette dimension sociale joue certainement un rôle dans la validation des travaux d'Edmond Becquerel. La reconnaissance scientifique qu'a son père, César Becquerel, membre de l'Académie des sciences, permet aussi à son fils de se positionner sous un angle favorable face à la communauté scientifique française. Cet aspect est visible, lorsque César Becquerel prend la parole lors d'une séance de l'Académie des sciences face à Jean-Baptiste Biot, pour prendre la défense de son fils.

De plus, François Arago, ennemi intime de Jean-Baptiste Biot[130], soutient personnellement le travail de Becquerel. Il est possible d'y voir au-delà de l'intérêt purement scientifique et politique, un intérêt individuel, puisque ces recherches lui permettent une nouvelle fois de s'opposer par l'intermédiaire d'Edmond Becquerel, à Jean-Baptiste Biot.

Enfin, le contexte scientifique de l'époque, dans lequel la question de la nature de la lumière est quasiment résolue, offre un terrain favorable aux travaux pouvant permettre d'achever celle-ci. En effet une grande partie de la communauté des physiciens a accepté le modèle ondulatoire de la lumière de Fresnel. Seuls quelques défenseurs de la théorie corpusculaire persistent. Jean-Baptiste Biot en est l'un des principaux. Le fait qu'Edmond Becquerel analyse la nature de la lumière solaire, et que ce travail provoque des réactions de Jean-Baptiste Biot peut permettre d'enrichir le débat et de s'approcher de sa résolution

[130] Buchwald, J. Z. (1989). "The battle between Arago and Biot over Fresnel." Journal of optics **20**(3): 109-117.

définitive. Cet aspect peut donner à ses recherches une reconnaissance de la communauté permettant la validation de certains de ses résultats.

Comme nous avons pu le montrer, la situation réelle analysée ici, présente des difficultés liées au contexte scientifique et social ainsi qu'à l'appareil lui-même. La complexité du cas étudié rend difficile l'application stricte d'un modèle d'expérience développé en philosophie des sciences. En effet nous avons pu montrer qu'il existe dans ce cas des modes de justification d'ordre épistémologique au sens d'Alan Franklin. Il est donc visible que le point de vue constructiviste développé par Collins est incomplet. Nous pensons en effet, dans la logique développée par Franklin, que l'activité scientifique présente des particularités de rationalité qui rendent efficace des argumentations de type épistémologique. Pour s'appliquer efficacement, le point de vue constructiviste doit selon nous rendre compte de cet élément.

Cependant, nous avons souhaité montrer que les modèles de justification d'ordre épistémologique ne peuvent s'appliquer à tous les cas concrets sans complexification. Les critères d'Alan Franklin, s'ils sont théoriquement stables et fiables, ne sont que très rarement identifiables individuellement. Lorsqu'ils interviennent dans un travail expérimental, tel que celui que nous avons analysé dans cette recherche, ces critères sont souvent entrelacés et interdépendants. L'exemple de la validation de l'actinomètre électrochimique par l'obtention des raies de Fraunhofer montre que cette validation exige d'appliquer en même temps deux critères. Le deuxième critère, celui de la validation de l'appareil par ses propres résultats comblant les déficits de l'appareil à appliquer totalement le premier.

De plus, nous avons souhaité montrer que d'autres registres de validation sont aussi présents lors de la construction et de l'utilisation de l'actinomètre électrochimique. Il est nécessaire, pour expliquer l'accord tacite de la communauté scientifique française face à l’invention de cet appareil d'invoquer d'autres types de mode de validation. L'influence de certains membres de la communauté scientifique, pour de multiples raisons, joue elle aussi un rôle important dans la validation du fonctionnement et des résultats de cet appareil.

Il nous semble donc important afin de ne pas négliger de mode d'explication, de nous positionner à l'intermédiaire entre rationalistes et constructivistes. Nous choisissons de prendre en compte ces différents aspects pour expliquer la validation de l'actinomètre électrochimique.

3. La question de la mesure

3.1. Le problème de la mesure posé par l'actinomètre

Si l'actinomètre électrochimique semble poser à l'époque des problèmes concernant sa validation, c'est probablement avant tout parce qu'il n'est pas un appareil construit dans un modèle théorique affirmé et structuré. Il ne représente pas officiellement un courant de pensée particulier. Cependant, il est très vite utilisé par Becquerel comme un appareil de mesure. Les résultats qu'il produit sont rapidement exploités pour différencier les zones du spectre solaire en fonction de leurs effets sur la matière. Les mesures que réalise Becquerel ne peuvent pas être considérées comme absolues. Il s'agit seulement ici d'entendre « mesure » au sens de relevé de valeur sur l'échelle d'un appareil. Mais lorsqu'il effectue des rapports entre ces valeurs, il semble leur attribuer un caractère particulier. Si cela ne leur donne pas de sens absolu, cela leur donne une dimension significative, puisqu'elles deviennent comparables entre elles. Elles sortent alors d'un simple statut de relevé de valeur, pour atteindre celui de mesure relative.

Selon Davis Baird[131], les instruments de mesure, qu'ils soient de simples règles, ou des spectromètres complexes, présentent une particularité qui les distingue de la plupart des instruments d'analyse scientifique. Les instruments de mesure, ne sont pas uniquement des représentants d'un modèle établi. Leur fonctionnement et leur utilisation par un chercheur introduit nécessairement des représentations matérielles du champ de mesure possible. Cette utilisation nécessite l'acceptation de l'efficacité même de l'instrument pour l'utilisation donnée. Dans ce sens, selon Baird, un instrument de mesure est une sorte d'hybride expérimental, à la frontière entre les sciences et la technologie, qui combine un modèle explicatif avec des connaissances procédurales. Ce point de vue peut nous amener à rechercher, derrière les connaissances et les méthodes expérimentales utilisées par Becquerel, la présence d'un modèle explicatif, peut-être implicite. Si ce modèle n'est pas directement identifiable dans les écrits d'Edmond Becquerel, il peut l'être par une analyse en négatif des réactions de la communauté, et en particulier de Jean-Baptiste Biot.

De nombreux philosophes des sciences ayant réfléchi sur les instruments de mesure considèrent que ceux-ci peuvent permettre d'extraire une information (une donnée) d'un

[131] Baird, D. (2004). Thing Knowledge, a philosophy of scientific instruments . Berkeley and Los Angeles, University of California press.

échantillon. Dans le cas qui nous préoccupe, en prenant en compte les réactions que l'actinomètre provoque, il nous semble plus prudent, comme le fait Davis Baird, de considérer que l'instrument interagit avec l'échantillon, ici une zone du spectre de lumière solaire, et que cette interaction génère un signal, ici un courant électrique. Ce signal, transformé par le galvanomètre, peut-être compris et interprété comme une information concernant l'échantillon.

Ce positionnement permet d'éclairer le débat qui s'installe entre Edmond Becquerel et Jean-Baptiste Biot. Nous pouvons alors considérer que cette controverse porte sur la dernière étape de ce cheminement c'est-à-dire l'interprétation du résultat mesuré comme une information concernant le spectre solaire. Il permet aussi d'expliquer pourquoi le bon fonctionnement de l'instrument nécessite l'habitude de sa manipulation et l'habileté de l'expérimentateur, comme nous avons pu le constater lors de l'activité de réplication. En effet, si l'instrument interagit avec l'échantillon, l'obtention de résultats réguliers et reproductibles nécessite de permettre que cette interaction se produise à chaque fois dans les mêmes conditions. C'est aussi ce que relève Ian Hacking lorsqu'il affirme que pour produire, au laboratoire, un phénomène numérique stable le manipulateur faire preuve d'un remarquable contrôle de l'appareillage. Si l'instrument ne permettait que l'extraction directe de l'information à partir de l'échantillon, son fonctionnement propre serait, selon Baird, naturellement stable, et les données seraient alors naturellement reproductibles.

Ce type de considération amène Baird à considérer que l'instrument de mesure « encapsule » de la connaissance, c'est-à-dire qu'il contient dans son existence même et dans son fonctionnement, des connaissances qui ne peuvent être considérées ni comme théoriques ni comme expérimentales, mais plutôt « instrumentales ». L'instrument de mesure produit un signal lors de son interaction avec l'échantillon, et ce signal représente un champ de possibilités d'interprétation non limité. Il sera ensuite interprété et analysé, au sein de l'appareil lui-même, avant l'obtention de la mesure finale. Dans cette étape intervient la connaissance encapsulée dans l'appareil. Selon Baird cette étape fait généralement intervenir les interprétations théoriques ou les modèles explicatifs implicites pour le constructeur de l'appareil, qui dirige le choix du signal généré, et les transformations appliquées à celui-ci pour le transformer en « mesure ».

L'actinomètre électrochimique permet dans son utilisation normale d'effectuer des mesures électriques, par l'intermédiaire d'un galvanomètre, des effets de la lumière sur les substances photosensibles. L'une des difficultés majeures présentées par ce type de mesures est que, le phénomène n'étant pas connu, il est impossible de réaliser une mesure quantitative

de ses effets en étalonnant l'appareil par l'utilisation d'une grandeur de même nature bien identifiée. De plus, l'appareil subissant des modifications régulièrement, puisqu'il nécessite de changer les plaques lorsque de la substance les recouvrant a réagi, il est impossible d'obtenir des mesures comparables entre elles sur une plage de temps longue. Les mesures ne sont, selon Becquerel, comparables que pour une paire de plaques données.

De plus, le fait que la construction de l'actinomètre électrochimique repose sur l'hypothèse que la quantité de substance qui réagit lors de la réaction photochimique est proportionnelle à la quantité de lumière reçue par ces substances crée une difficulté supplémentaire pour l'acceptation de l'objectivité des mesures effectuées. En effet, la comparaison de ces mesures entre elles, pour une paire de plaques données, nécessite d'accepter cette hypothèse, c'est-à-dire d'accepter qu'il n'existe qu'un seul type de causes qui produise ces effets. Sans cela, puisque chaque mesure correspond à une couleur différente du spectre solaire c'est-à-dire à une longueur d'onde, il serait possible d'envisager que pour certaines zones du spectre d'autres éléments interviennent dans la réaction et la modifient. Dans ce cas là, les résultats ne seraient plus comparables entre eux.

C'est une des oppositions que soulève Jean-Baptiste Biot à l'utilisation de l'actinomètre électrochimique. Selon lui cet appareil ne peut pas être considéré comme « un mesureur », mais seulement comme un « indicateur »[132]. Il peut permettre de mettre en évidence la présence de lumière, parce qu'il se produit une réaction photochimique, mais ne peut pas permettre d'analyser la lumière solaire, parce que l'on ne sait pas ce qui agit, dans cette lumière, sur la matière. Les raisons que l'on peut identifier pour expliquer cette opposition sont détaillées dans la partie traitant des implications théoriques de l'appareil.

Il y a en effet visiblement des connaissances, ou plutôt, dans le cas de l'actinomètre, des hypothèses encapsulées, au sens de Baird, dans l'actinomètre. En effet, les hypothèses que nous développons ne sont pas toutes explicitement développées par Edmond Becquerel. Concernant la proportionnalité des mesures avec la quantité de rayonnement reçu en particulier. Il nous semble indispensable, pour accepter cette hypothèse de se placer dans un contexte théorique ondulatoire. Si l'on accepte cette approche, et en analysant les réactions de Biot, il est possible de penser que ces informations sont encapsulées dans l'appareil, et agissent sur le résultat avant le relevé de mesure, puisqu'elles interviennent sur le sens donné à cette mesure. Prendre en compte le point de vue de Baird peut nous permettre d'expliquer

[132] Biot, J.-B. (1839). "Remarque de M.Biot sur note lue par M. Becquerel." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 169-172.

les multiples réactions de Biot, connaissant ses positionnements théoriques concernant la nature de la lumière. Cette approche éclaire la controverse Biot-Becquerel sous un angle différent.

La question de la mesure est donc centrale dans l'analyse de l'invention de l'actinomètre électrochimique. Cet appareil a une fonction particulière, puisqu'il permet d'obtenir des résultats numériques. Cependant on peut se demander quelle valeur on peut attribuer à ces résultats.

3.2. La question de la quantification

La question de la mesure est d'autant plus centrale dans l'analyse de l'invention et de l'utilisation de l'actinomètre électrochimique que l'usage qu'en fait Edmond Becquerel est spécifique. En effet, s'il réalise des mesures systématiques des effets des différentes longueurs d'onde du spectre solaire sur les substances photosensibles à l'aide de l'actinomètre électrochimique, il est impossible de donner de valeur « absolue » aux grandeurs obtenues. Le domaine exploré étant totalement nouveau, et la méthode employée pour l'explorer absolument originale, il ne dispose d'aucun point de repère pour étalonner son appareil. Il ne dispose pas non plus bien sûr d'une unité ou d'une grandeur de référence lui permettant de considérer ces mesures comme ayant une valeur absolue.

Le travail qu'il réalise, et la manière dont il considère ces données numériques montrent qu'il est conscient de cette limite. En effet, le seul graphique, ou courbe, qu'il produit pour ce travail possède deux axes. Les abscisses sont graduées et normées en fonction de la position dans le spectre de la lumière analysée pour le point considéré, en utilisant les repères lettrés imaginés par Fraunhofer. Les ordonnées, représentant l'importance des effets produits par la lumière sur la matière, mesurée par l'intermédiaire du galvanomètre, ne comportent de représentation ni de norme ni d'unité. Ces grandeurs mesurées n'ont ainsi aucune référence absolue.

Cependant le simple fait de produire une courbe implique qu'Edmond Becquerel considère que certaines des valeurs mesurées sont au moins comparables entre elles. Pour une paire de plaques données, et pour une série de mesures se déroulant sur un temps bref avec la même source lumineuse solaire, il considère que les données obtenues pour différentes zones du spectre solaire sont comparables entre elles. Il peut donc les représenter ensemble, sur un même graphique, et les relier entre elles, afin de mettre en évidence des variations de ses

effets en fonction de la longueur d'onde de la lumière. Ce type d'utilisation des mesures ne peut être assimilé à une quantification réelle. En effet il n'y a pas de référence à laquelle rapporter les mesures, qui permettent de les considérer comme des quantités absolues. Cette exploitation de données numériques peut plutôt être considérée comme une recherche d'ordre, ou un classement de l'importance des effets. La manière dont il utilise ces données lui permet d'affirmer que les rayons violets ont lors de la première exposition de la plaque un effet plus grand que les rayons rouges sur la substance. Et c'est la seule exploitation qu'il s'autorise de ces données numériques.

C'est par cette recherche de comparaison qu'il obtiendra le premier résultat essentiel, prouvant le fonctionnement de l'actinomètre électrochimique, la vérification de la position des raies sombres de Fraunhofer. En effet il note pour certaines zones du spectre une absence de déviation de l'aiguille du galvanomètre qu'il interprète comme une absence d'effet de la lumière sur la matière. Pour ces zones, dont il a montré expérimentalement non pas quelle importance devaient avoir ces effets mais qu'il devait y en avoir, l'absence de réaction du galvanomètre indique l'absence de lumière.

Ce type d'exploitation de données numériques est tout à fait particulier. Il s'agit d'un classement, dont l'étape initiale peut être considérée comme une relation présence-absence, ou « oui-non ». Ceci est d'autant plus important dans le débat qui se déroule entre Edmond Becquerel et Jean-Baptiste Biot, que ce dernier lui reproche d'utiliser son appareil en tant que mesureur, alors qu'il ne peut être considéré que comme un indicateur. Ce que lui reproche Jean-Baptiste Biot, et que nous développons dans la partie analysant le contenu théorique de ce débat, est qu'il est impossible d'identifier les causes lumineuses produisant ces effets chimiques. Effectuer des mesures n'a alors aucun sens, selon Biot, puisque l'on ne connaît ni les causes, ni la quantité de celles-ci. L'utilisation que fait Becquerel de l'actinomètre électrochimique pour mettre en évidence les raies Fraunhofer dans le spectre visible de la lumière solaire ne nécessite pas de considérer ce dernier comme un mesureur. En le considérant simplement comme un indicateur de présence de lumière, et en l'utilisant à ces fins Edmond Becquerel parvient à ce premier résultat.

Il en sera de même, lorsque l'actinomètre électrochimique permettra à Becquerel de mettre en évidence la présence de ces raies dans la zone au-delà du violet. Cette utilisation, comme détecteur de lumière, rend beaucoup plus difficile la critique de Jean-Baptiste Biot. Becquerel, après sa première vérification, semble considérer qu'il a répondu à l'ensemble des remarques de son contradicteur, ses publications ne feront plus mention de ces oppositions.

On peut alors se demander les raisons qui poussent Becquerel à effectuer des relevés

extrêmement précis et systématiques des quantités de déviation subie par l'aiguille du galvanomètre, si la seule utilisation qu'il en fait est en réalité une utilisation du type présence-absence. Ce point nous amène à envisager que Becquerel considère son appareil aussi comme un mesureur. Cela peut permettre d'appuyer l'hypothèse que nous émettons quant aux conceptions ondulatoires de ce dernier sur la lumière. Ceci est développé de manière détaillée dans la partie d'analyse du contenu théorique de l'appareil. Mais une autre raison, inhérente à l'ensemble de la carrière de Becquerel semble importante. En effet il publiera jusqu'à la fin de sa carrière de nombreux tableaux de chiffres, reflétant des mesures qu'il a effectuées avec des appareils qu'il a inventés, sans parfois la moindre interprétation ou la moindre justification théorique. Il justifie cette démarche en proposant aux théoriciens contemporains, ou à venir, d'exploiter ces résultats avec la plus grande confiance en l'exactitude expérimentale, afin de les utiliser pour produire une théorie explicative. Il dit lui-même ne pas avoir les compétences nécessaires pour l'élaborer, mais souhaite mettre au service de la communauté scientifique ses compétences d'expérimentateur.

Il est donc probable que Becquerel pense qu'il serait possible d'exploiter les grandeurs numériques exactes qu'il relève, même si dans le contexte scientifique de l'époque, cela n'est pas encore imaginable.

La différence entre Becquerel et Biot résiderait-elle dans ces considérations ? il faudrait alors admettre que Jean-Baptiste Biot ne voit aucun moyen, même futur et encore inenvisageable d'utiliser ces données numériques. La seule raison qui peut permettre de justifier une telle considération, de la part d'un théoricien et d'un expérimentateur aussi chevronné que Biot, est qu'il ne voit dans ces grandeurs aucune possibilité d'exploitation. Probablement, comme il le dit lui-même, parce que selon lui ces effets sont probablement produits par plusieurs causes simultanées et superposées, ni identifiables ni quantifiables, qui ne permettront pas d'extraire de chacune de ces données les proportions de celles-ci produites par chacune des causes.

La question de la quantification, ou de la valeur donnée aux mesures effectuées par Becquerel est donc centrale dans le débat qui l'oppose à Jean-Baptiste Biot. Elle conditionne une partie des oppositions que lui fait ce dernier, mais aussi la manière dont sera utilisé l'actinomètre électrochimique. Cette rigueur imposée par Biot dans l'exploitation des données numériques sera pour beaucoup dans les résultats qu'obtiendra Edmond Becquerel grâce à cet appareil.

4. L'importance de la controverse

4.1. Le rôle des controverses dans la pratique scientifique

Si l'utilisation des controverses comme moyen d'investigation en histoire des sciences est répandue, sa définition stricte n'est pas souvent présentée. Il est dans un premier temps nécessaire à la bonne compréhension de la situation de cerner ce que nous entendons par le terme controverse, afin de placer l'analyse présentée ici dans un contexte précis. Ceci nous permettra d'identifier, par l'intermédiaire des caractéristiques que nous choisirons, des éléments particuliers du débat, parfois masqués par le contexte scientifique de l'époque.

Nous pourrons ensuite développer les particularités de la controverse scientifique elle-même.

4.1.1. Qu'est ce qu'une controverse ?

Il existe différents types de débats, de discussions opposant deux ou plusieurs individus, s'inscrivant dans un espace et une temporalité particulière. Nous pouvons citer pour exemple la dispute, le débat d'idée, la conversation. La controverse scientifique est, pour nous, l'un de ces types de discours.

La controverse est une discussion suivie sur une question. Elle est distincte de la querelle, dans le sens ou elle doit être raisonnée. Son découpage en parties élémentaires, chaque partie pouvant être une nouvelle intervention de l'un des protagonistes, doit présenter des arguments nouveaux, des résultats ou des hypothèses permettant de faire progresser le contenu intellectuel de la controverse. Ces éléments nouveaux sont du niveau du débat et l'alimente. Ceci exclut donc les attaques personnelles, les insultes et autres agressions, inhérentes à la querelle.

Une controverse scientifique doit prendre place dans un espace physique, géographique comme un lieu de rencontre entre les différents protagonistes, ou dans un espace virtuel, tel qu'une revue, un journal ou une relation épistolaire. La controverse scientifique s'inscrit de plus dans un espace intellectuel particulier, centré sur un concept, un domaine d'étude ou un fait nouveau. Elle s'inscrit souvent dans un débat plus profond, une déstabilisation temporaire de la science en place, ou l'apparition de nouvelles conceptions scientifiques. Cet espace est identifié par une communauté particulière. Elle ne prend son sens

que considérée dans le contexte de cette communauté. En effet, il est nécessaire de distinguer, pour comprendre la controverse, et parfois même seulement pour l'identifier comme telle, de maîtriser le sujet du débat afin d'identifier les différences entre les discours en opposition, et d'accéder aux lieux où elle apparaît afin de pouvoir en suivre la progression.

Une controverse est le plus souvent bipartite, mais peut contenir davantage de points de vue. Chacune des parties pouvant être soit un individu, soit un groupe d'individus réunis autour du sujet de la controverse. Nous disons qu'il peut y avoir plus de parties au sein de celle-ci, car souvent, lorsqu'elle implique des groupes d'individus, elle laisse apparaître des avis dissidents, des modérateurs et des médiateurs, se distinguant parfois sensiblement des courants de discussion dominants. Toutefois, d'une manière générale, lors d'une controverse scientifique, nous pouvons la plupart du temps identifier deux courants de pensée majoritaire en opposition. Ce cas, le plus simple à étudier, est celui qui nous concerne.

4.1.2. La controverse scientifique

Selon Aristides Baltas[133], les controverses scientifiques sont simplement des désaccords entre les praticiens d'une science donnée concernant un ou plusieurs aspects de leur pratique. Elles sont des désaccords portant sur le moyen de résoudre un problème donné, sur la solution adéquate à l'un de ces problèmes, ou sur les critères à employer pour répondre à une question donnée. Mais une controverse scientifique ne se limite pas à un simple désaccord, c'est un désaccord qui ne peut se résoudre simplement en appliquant les règles établies à une époque donnée pour pratiquer cette science. Elle peut même parfois remettre en question, lors de son déroulement les règles mêmes de la discipline de laquelle elle est issue.

Pour Gideon Freudenthal[134], étudier une controverse se déclenchant sur un sujet de recherche particulier peut permettre de distinguer l'objet de cette recherche du sens réel que lui accordent ses protagonistes. Pour lui, le terme controverse est un terme technique mal défini et pourtant souvent employé. Il y a différents types de désaccords, en sciences comme ailleurs, il choisit d'utiliser le terme de controverse scientifique pour parler spécifiquement des discussions durables et antagonistes sur un désaccord concernant un point spécifique d'une science, qui ne peut être résolu en appliquant les standards établis par la discipline concernée.

[133] Baltas, A. (2000). Classifying scientific controversies. Scientific controversies, philosophical and historical perspectives. P. Machamer, M. Pera and A. Baltas. Oxford, Oxford University press**:** 40-49.

[134] Freudenthal, G. Ibid.A rational controversy over compounding forces**:** 125-142.

Mais toute discussion sur les sujets scientifiques ne sont pas des controverses scientifiques. Une controverse scientifique doit selon lui, et comme nous l'avons développé précédemment, avoir un contenu scientifique et être menée en utilisant les arguments de ce registre. Les limites de ce que l'on entend par « scientifique » sont selon lui aussi précises, ou aussi floues, que ce que l'on entend par « science ». La classification d'un débat en termes de controverse ne peut donc se faire qu'a posteriori.

La discussion doit être persistante et antagoniste pour être qualifiée de controverse. Un simple désaccord résolu après un seul échange ou un désaccord qui débouche sur une mise en commun des moyens de recherche ne peuvent être qualifiés de controverse. Une discussion qui a pu être résolue par les outils standards de la discipline concernée n'est pas non plus une controverse. Des discussions sur un sujet scientifique ou un fait ne tournent pas nécessairement en controverse. Dans une communauté scientifique établie et dans des circonstances normales, une discussion sur des techniques de mesure par exemple n'est pas une controverse.

Mais ce type de définition par la négative ne nous permet pas de définir précisément ce que l'on peut entendre par le terme controverse. Un désaccord devient une controverse parce qu'elle ne peut pas être résolue par les moyens habituels utilisés par la communauté. En général une controverse porte sur l'interprétation des faits plutôt que sur leur réelle existence ou leur validité. Cette question de la validité peut être simplement résolue en identifiant des erreurs, sans pour autant déclencher de controverse.

La particularité d'une controverse scientifique par rapport à une controverse religieuse par exemple est, selon Freudenthal, qu'elle peut être résolue par l'utilisation d'arguments et de justifications du même registre que le domaine sur lequel elle porte. Alors qu'une controverse religieuse ne peut jamais être résolue.

Une controverse scientifique existe quand chaque camp tente de démontrer l'exactitude de ses positions en montrant qu'elles rendent possible l'explication de cas particuliers, en démontrant leurs capacités à expliquer de nouveaux cas. Parallèlement, une technique habituelle dans les controverses consiste à démontrer l'inefficacité de la conception rivale à respecter ces points.

Une controverse est possible parce que les différents points de vue se positionnent dans le même schéma conceptuel général. Sinon la communication risque d'être impossible entre les protagonistes, et les différentes vues peuvent ne pas être incompatibles. Ainsi une controverse scientifique n'apparaît seulement que quand les adversaires partagent le même système conceptuel, mais que leurs interprétations sont exclusives l'une de l'autre. Maurizio

Mamiani[135] rajoute une condition importante pour que l'on puisse considérer qu'une controverse est réellement scientifique : il faut selon lui qu'il n'y ait aucune compétition personnelle possible entre les protagonistes. Ceux-ci ne doivent être animés que par la quête de la vérité, et ne pas être séparés par des querelles précédentes.

Il semble que la résolution d'une controverse se déroule rarement par la simple preuve de l'exactitude des conceptions de l'un, et de la fausseté de l'autre. D'une manière générale la résolution d'une controverse implique que chaque protagoniste ait eu une influence sur l'autre en faisant évoluer ses conceptions. C'est la raison pour laquelle une controverse scientifique peut être productive pour une discipline, ou du moins que l'on ne peut pas la considérer comme un frein à la progression de celle-ci.

Selon ces auteurs, une controverse scientifique porte donc sur des désaccords de fond concernant une discipline scientifique. Baltas admet qu'il est possible qu'une controverse porte sur des points méthodologiques ou expérimentaux particuliers. Cependant, il y voit d'une manière générale un moyen de camoufler des désaccords plus profonds non explicités. Selon lui la résolution de ce désaccord ponctuel ne résout alors pas le débat qui s'était engagé. Cela peut permettre de rechercher des raisons plus profondes expliquant la poursuite du débat.

4.2. Le cas de la controverse Biot Becquerel

4.2.1. Ce débat est-il une controverse ?

La manière dont se déroule le débat qui oppose Edmond Becquerel à Jean-Baptiste Biot, ainsi que les raisons qui les y poussent nous amènent à considérer que l'on peut le qualifier de controverse scientifique.

Tout d'abord à aucun moment dans les échanges qui ont lieu au sein des comptes rendus de l'Académie des sciences entre ces deux hommes, n'apparaissent d'autres arguments que ceux du registre scientifique. Les oppositions et les propositions de Jean-Baptiste Biot portent toutes sur des points expérimentaux, ou sur des points d'interprétation de résultats, mais jamais n'apparaît d'argument d'autorité du chercheur reconnu sur le chercheur en devenir.

Nous émettons l'hypothèse, que nous développons dans la partie d'analyse du contenu théorique du travail d'Edmond Becquerel, que ces désaccords portant essentiellement sur des

[135] Mamiani, M. Ibid.The structure of a scientific controversy, Oxford university press**:** 143-152.

points d'exactitude et de précision expérimentale cachent en réalité un désaccord plus profond concernant la nature même de la lumière. Partant de cette hypothèse, il est possible de considérer ces deux chercheurs comme partageant des schémas conceptuels généraux communs, au sens de Freudenthal, concernant la physique telle qu'elle est pratiquée au XIXe siècle en France. Le désaccord que cette discipline ne saurait résoudre à l'époque où se déroule cette controverse porte sur la nature même de la lumière, Jean-Baptiste Biot défendant une théorie ondulatoire. Il est, de plus, communément admis à l'époque que ces deux conceptions de la lumière sont radicalement incompatibles. Les méthodes mises en œuvre par Edmond Becquerel dans ses expériences ne relevant pas des pratiques de la science dite normale de l'époque, puisque les procédés qu'il utilise sont totalement nouveaux, cette science standard ne saurait trancher dans le débat qui oppose les deux hommes. Les remarques et objections de Biot au travail d'Edmond Becquerel semblent a priori essentiellement viser à la déstabilisation de ses résultats.

Il n'est quasiment pas fait mention d'une théorie concurrente à laquelle Becquerel chercherait à se rattacher. Ce point semble en désaccord avec la manière dont Freudenthal qualifie les controverses scientifiques. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette absence. D'une part si l'on accepte l'hypothèse que nous émettons concernant l'existence d'un arrière plan théorique au débat expérimental, celui-ci n'est pas explicitement le centre de la question. Cependant la situation historique dans laquelle se déroule ce débat, conduit inévitablement, si l'on parvenait à invalider l'une des théories, à rendre l'autre acceptable. Mais la situation dans laquelle se trouve Biot en 1839 peut, elle aussi, expliquer cette absence. En effet, il se trouve être l'un des derniers défenseurs, en tout cas le plus fervent, d'une théorie que la communauté scientifique a quasiment abandonnée au profit de la théorie ondulatoire. Sa situation ne lui permet plus de défendre la théorie corpusculaire, mais le conduit à tenter de freiner les progrès de sa concurrente.

Les caractéristiques permettant de définir une controverse semblent pour la plupart réunies dans le cas étudié. Les particularités que présente cette controverse, dues essentiellement à sa localisation chronologique dans l'histoire des sciences peuvent amener quelques adaptations aux définitions développées plus haut. Cependant il nous semble possible de qualifier ce débat de controverse scientifique.

La manière dont va se résoudre le débat semble elle aussi permettre de le qualifier de controverse. En effet comme nous avons souhaité le montrer, les remarques et objections de Biot permettent à Edmond Becquerel d'améliorer ses procédés, de les développer, parfois même de les modifier, afin de répondre à celui-ci. Les objections expérimentales seront donc

très productives dans la progression du travail d'Edmond Becquerel. Les objections épistémologiques de Jean-Baptiste Biot portent elles-aussi leurs fruits, comme nous l'avons montré précédemment. La distinction qu'il effectue entre appareil mesureur et appareil indicateur conduit Becquerel à développer l'usage de l'actinomètre électrochimique dans sa dernière fonction, et lui permet d'aboutir à un élément de preuve concernant la nature lumineuse des rayons au-delà du violet. Il semble clair que la résolution de cette controverse se fait par un enrichissement mutuel des deux protagonistes. Ceci correspond à la qualification de controverse au sens de Freudenthal.

Cependant, la controverse qui est résolue concerne l'efficacité et le fonctionnement de l'actinomètre électrochimique. A aucun moment l'on ne peut identifier dans les propos de l'un ou l'autre des protagonistes la résolution du désaccord profond dont nous émettons l'hypothèse concernant la nature de la lumière. Baltas identifie trois catégories principales de controverse. Sans détailler le fond de chacune de celles-ci, il est possible simplement de les distinguer par la profondeur du désaccord entre les protagonistes. Le premier cas oppose différentes traditions scientifiques, ou différents styles de raisonnement, qui conditionnent les préférences subjectives de chacun sur les directions à explorer au niveau méthodologique ou physique. Le deuxième cas concerne les débats entre deux parties qui partagent une théorie ou une série de résultats, mais qui sont en désaccord sur l'interprétation que l'on peut en faire. Le troisième cas représente les désaccords complets et profonds concernant le fond même de la théorie ou du modèle en jeu.

Cette classification théorique semble efficace mais peut nécessiter des adaptations. Nous pensons qu'il est possible que plusieurs de ces cas soient imbriqués dans une seule et même controverse, et rendent plus difficile l'analyse de sa résolution.

On peut considérer que la controverse qui se déroule entre Biot et Becquerel relève du premier cas, pour ce qui concerne le fonctionnement de l'actinomètre électrochimique et des instruments précédents. En effet les protagonistes sont d'accord sur les moyens mis en œuvre pour l'exploration de ce nouveau domaine, mais des divergences dans la manière de travailler existent. Biot, en tant que membre de la société d'Arcueil attache une importance considérable à la théorie expliquant des résultats expérimentaux, alors que Becquerel se positionne comme un expérimentateur pur ne recherchant pas systématiquement de justifications théoriques à ses résultats.

D'un autre point de vue, et si l'on accepte l'hypothèse que nous émettons sur un désaccord théorique profond entre les deux protagonistes, cette controverse relève aussi du

troisième cas proposé par Baltas. Si comme nous le supposons, ces deux cas sont imbriqués dans la controverse qui se déroule entre Jean-Baptiste Biot et Edmond Becquerel, l'analyse de sa résolution est complexe. La dimension de celle-ci portant spécifiquement sur l'actinomètre électrochimique peut se résoudre, et est résolue par l'acceptation commune de modifications et de compromis qui amèneront Biot à reconnaître Becquerel comme un brillant expérimentateur. Mais son autre dimension, portant sur des questions beaucoup plus profondes concernant les théories sur la nature de la lumière ne peut être résolue par les travaux discutés ici. Elle le peut d'autant moins que même après les résultats expérimentaux obtenus par Léon Foucault en 1849 démontrant la supériorité de la théorie ondulatoire sur la théorie corpusculaire, Jean-Baptiste Biot n'acceptera pas de renoncer à ses conceptions.

Ce débat, tel que nous le percevons, présente une complexité beaucoup plus grande que les cas théoriques de controverse développés par les philosophes des sciences. Toutefois ces caractéristiques particulières et les conditions dans lesquelles il se résout semblent permettre de le qualifier de controverse scientifique.

4.2.2. Comment exploiter cette controverse ?

De l'intérêt que l'on peut porter à la controverse entre Edmond Becquerel et Jean-Baptiste Biot, naît divers questionnements qui pourront nous permettre de cerner les tenants et les aboutissants du débat. Nous pensons pouvoir ainsi, d'une part comprendre les motifs scientifiques et sociaux qui poussent Biot à prendre une position apparemment radicale face aux résultats et aux hypothèses de Becquerel, et d'autre part cerner les conceptions de ce dernier sur la nature de la lumière, sur la nature de la réaction photochimique et sur le fonctionnement électrochimique de ces réactions.

En effet, si les considérations théoriques sur ces différents points sont rarement et brièvement explicitées dans les travaux d'Edmond Becquerel, les oppositions que Jean-Baptiste Biot y fait systématiquement sont, elles, nécessairement justifiées. Sa position de scientifique reconnu, s'affrontant à un jeune chercheur, E. Becquerel n'a que dix huit ans en 1839, l'oblige à développer une argumentation scientifique étayée pour justifier ses oppositions.

Nous pensons, par un effet de miroir, c'est-à-dire en étudiant les arguments de Biot, pouvoir mieux déterminer les choix théoriques fait, sous tendus par une formation particulière dans sa pratique de chercheur, par Edmond Becquerel, et influençant inévitablement ses travaux.

En effet, malgré une recherche approfondie, nous n'avons pu identifier aucune trace permettant d'attribuer les remarques, et parfois les agressions de Biot à l'encontre d'Edmond Becquerel à des motifs autres que purement scientifiques. Nous ne pouvons pas, bien sûr, avoir la certitude qu'il n'existe pas d'autres points de désaccord, dont nous n'aurions aujourd'hui plus de trace identifiée, d'ordre personnel ou politique. Nous faisons donc le choix de n'expliquer ces discordances et ces désaccords en n'y voyant que des convictions scientifiques de fond. Nous considérons que ces convictions impliquent des positions sociales et personnelles, mais choisissons de ne les prendre en compte que comme induites et impliquées par les positions scientifiques, concernant les choix théoriques, et par les positions institutionnelles au sein de la communauté des scientifiques de l'époque.

L'utilisation que nous souhaitons faire de l'analyse de la controverse correspond donc a celle que propose Freudenthal. Elle nous permet de faire apparaître, derrière un débat concernant l'objet d'étude, le sens profond et masqué que donnent les protagonistes de cette controverse à celui-ci. On peut en effet observer que le désaccord entre Biot et Becquerel, qui peut au premier abord sembler centré sur des considérations expérimentales, en masque un autre, plus profond, concernant la nature de la lumière. C'est par l'analyse du sens que Biot donne aux travaux de Becquerel que l'on voit apparaître ces considérations théoriques. L'utilisation de la controverse comme outil d'analyse permet de le mettre en évidence.

5. La réplication d'expériences scientifiques

Nous avons mis en œuvre dans ce travail un autre outil pour explorer la démarche de travail d'Edmond Becquerel. Il s'agit de la réplication des expériences qu'il a réalisées entre 1839 et 1843. L'activité de réplication, si elle peut permettre d'apporter des informations précises en développant certains points obscurs des publications, est une démarche que l'on peut considérer comme problématique dans l'activité d'investigation en histoire des sciences. Il s'agira d'abord ici de développer le point de vue de différents historiens sur la question, afin dans un deuxième temps, de situer notre démarche lors du travail de réplication que nous avons effectué.

5.1. Rôle de la réplication dans l'investigation en histoire des sciences

L'activité de réplication nécessite d'abord de considérer qu'un travail de recherche scientifique, impliquant des expériences, doit nécessairement impliquer un critère de

reproductibilité. C'est-à-dire que tout travail scientifique au sens strict, nécessite dans sa réalisation une rigueur et une précision suffisante pour que ce travail soit reproductible immédiatement ou à une échelle plus longue. Cette question longuement débattue par les scientifiques eux-mêmes amènent de nombreuses difficultés. Alan Franklin[136] considère en réalité la réplication comme l'un des moyens parmi d'autres de validation, acceptant l'idée que toute expérience ne soit pas reproductible. En effet, comme le soulève Xian Chen[137], il existe des phénomènes complexes lors de la construction d'instruments ou d'expériences, impliquant en particulier des conditions sociologiques, prises en compte par Collins[138], qu'il est souvent difficile d'identifier a posteriori, et quoi qu'il en soit généralement impossibles à reproduire. Si l'on accepte qu'une partie du contexte socio-scientifique d'une époque soit « encapsulé »[139] dans un instrument ou une expérience, reconstruire même après un temps bref ces conditions afin de reproduire exactement l'expérience semble impossible.

Mais considérant que la réplication d'une expérience est parfois le seul moyen d'investigation dont dispose le chercheur pour comprendre un résultat ou une démarche, Xian Chen soulève une autre difficulté. Sachant qu'un grand nombre de facteurs intervient dans la réalisation d'une expérience, et que tous ne sont pas directement identifiables, y a-t-il un moyen de déterminer qu'une réplication, ou une simple reproduction d'expérience, aboutit à un résultat positif ou négatif ? Un résultat négatif, un problème de correspondance entre les résultats de la réplication et les résultats initiaux peuvent relever d'un grand nombre de facteurs, ne permettant pas de conclure à l'inefficacité de l'expérience initiale. Il ne permet pas non plus de conclure à l'inefficacité de la réplication. En effet ce résultat peut être dû à une erreur de manipulation, une erreur de reproduction, ou simplement l'impossibilité de prendre en compte un paramètre, qui peut être essentiel à la réussite de l'expérience. L'outil essentiel dans l'activité de réplication est le texte écrit par l'auteur initial de l'expérience. Un grand nombre d'informations y est généralement donné. Mais certains points particuliers, tels que les techniques de manipulation, ou les éléments jouxtant l'expérience dans le laboratoire, ne sont parfois pas précisés. Si ces éléments participent à l'expérience, il sera impossible de les

---

[136] Franklin, A. (1986). The neglect of experiment. Cambridge, Cambridge university press.

[137] Chen, X. (1994). "The rule of reproductibility and its applications in experiment appraisal." Synthese **99**: 87-109.

[138] Collins, H. M. (1992). Changing order, replication and induction in scientific practice. Chicago, University of Chicago press.

[139] Baird, D. (2004). Thing Knowledge, a philosophy of scientific instruments. Berkeley and Los Angeles, University of California press.

reproduire. De plus les habitudes de manipulation, et les pratiques expérimentales d'une époque, ne sont généralement pas décrites, puisqu'elles sont transmises de manière orale. Ces habitudes peuvent donc se perdre au cours du temps. Dominique Pestre propose l'idée que « *quelque chose de la pratique reste à jamais insaisissable par la parole et que toute pratique a une dimension authentiquement locale et propre à chaque système et à chaque individualité* [140]».

Xian Chen établit des règles de reproductibilité afin d'évaluer la bonne réalisation d'une réplication, que l'on peut résumer de la manière suivante : si on obtient le même résultat à travers un montage de réplication qu'avec le montage original le résultat est reproductible. Et si le montage expérimental est répété de manière identique à l'expérience originale la réplication est valide. Il soulève donc ici un problème particulier puisque ces deux règles sont interdépendantes l'une de l'autre.

La situation dans laquelle on tombe correspond alors à ce que nous avons décrit plus haut sous le nom de cercle vicieux expérimental au sens de Collins. La valeur d'une reproduction d'expérience ne peut alors être établie que lors de négociations entre les scientifiques, en prenant en compte les conventions sociales qui déterminent les standards d'une science donnée. En effet, s'il est impossible de réaliser une réplication exacte, ou du moins s'il est impossible de déterminer qu'une réplication est exacte, le seul outil disponible permettant d'exploiter les résultats d'une réplication est un outil du registre social, c'est-à-dire un accord au sein de la communauté, entre praticiens.

La démarche de réplication de l'historien des sciences présente cependant quelques distinctions avec la démarche de réplication du scientifique qui souhaite s'assurer de l'exactitude d'un résultat. En effet la distance temporelle qui sépare l'expérience initiale de la réplication est beaucoup plus grande. Le nombre des éléments indisponibles au moment de ces réplications, en particulier les habitudes de manipulation, est beaucoup plus grand. Par contre, les connaissances scientifiques concernant le domaine d'étude ont évolué, permettant ainsi d'évaluer de manière différente la validité d'un résultat expérimental. On peut alors utiliser le critère de cohérence développé par Alan Franklin[141], concernant la relation que doit entretenir le résultat expérimental, ou du moins son interprétation, avec la réalité concrète. On

---

[140] Pestre, D. (1994). La pratique de reconstitution des expériences historiques, une toute première réflexion. Restaging Coulomb: usages, controverses et réplications autour de la balance de torsion. C. B. a. M. Dörries. Firenze, Leo S. Olschki**:** 17-30.

[141] Franklin, A. (1986). The neglect of experiment. Cambridge, Cambridge university press.

peut en effet avoir une approche plus large du champ étudié, connaissant les travaux réalisés ensuite, pour juger de la qualité des résultats d'une expérience, et donc de la validité d'une réplication. On peut aussi, parce que l'instrumentation a elle aussi évolué, connaître mieux le phénomène étudié que l'auteur initial de l'expérimentation. Mais ce type de démarche risque de conduire à de lourds anachronismes dans l'analyse même des résultats de la réplication. L'historien qui souhaite répliquer est alors placé dans une situation inextricable. Compléter les informations disponibles par des connaissances modernes peut enrichir sa démarche mais le conduire dans une voie d'analyse erronée, car fondée sur des considérations anachroniques. Lors de la réplication, Pestre signale que l'expérimentateur doit cependant supposer « *une régularité de la nature dans l'espace et dans le temps* » et en particulier considérer que le phénomène physique étudié est de même nature actuellement qu'il l'était au moment de l'expérience initiale. Cette simple hypothèse, même si elle semble basée sur le bon sens, engage l'expérimentateur qui réalise une réplication dans une démarche délibérément anachronique.

On peut se demander ensuite quels types d'informations peut apporter, dans le cadre d'une application historique, cette démarche de reproduction d'expériences. Adelheid Voskuhl[142] identifie trois niveaux d'information possibles pour cette pratique. Tout d'abord elle y voit un niveau technique. Il s'agit dans ce cas là, lors de la réplication d'obtenir des informations supplémentaires, permettant de compléter ou de démentir certains éléments contenus dans les publications. On peut par exemple identifier une reconstruction a posteriori de la démarche expérimentale, comprendre comment un appareil doit être utilisé pour que l'expérience soit probante, ou comprendre comment l'espace dans lequel a été réalisée l'expérience était organisé. Le deuxième niveau est celui qui permet à l'historien d'identifier les éléments non textuels tels que la complexité et les difficultés de la réalisation des expériences, les limites historiques de celles-ci. Le troisième niveau est celui où l'on cherche à trouver une explication historique au fait qu'une expérience a été considérée comme un succès ou un échec à son époque. Otto Sibum[143] utilise le concept de connaissance gestuelle (gestural knowledge), pour développer les informations auxquelles on peut accéder par la réplication dans ce dernier niveau. Il considère qu'une partie des critères de validation d'une expérience

[142] Voskuhl, A. (1997). "Recreating Herschel actinometry: an essay in the historiography of experimental practice." British journal for the history of science **30**: 337-355.

[143] Sibum, O. (1994). "Reworking the mechanical equivalent of heat: instruments of precision and gestures of accuracy in early victorian England." Studies in the history and the philosophy of science(26): 73-106.

sont valides à une époque donnée parce que l'expérience elle-même est réalisée de manière cohérente avec les pratiques expérimentales de l'époque. Il s'agit en particulier pour lui d'une manière de manipuler, incluant des gestes particuliers, correspondant à une habitude pour une communauté scientifique donnée. Le seul moyen disponible pour l'historien pour retrouver ce type de connaissances, se transmettant par l'habitude et la formation orale, est la réplication systématique, et l'adaptation de l'expérimentateur moderne au montage expérimental ancien, afin de retrouver ces particularités, qui restent implicites dans les publications.

5.2. Comment réaliser une réplication ?

La question qui se pose ensuite concerne la manière à employer pour réaliser une réplication historique. Deux voies s'offrent à l'historien des sciences pour répliquer une expérience historique. Soit l'on choisit de reproduire exactement à l'identique l'expérience ou l'instrument qui nous intéresse, soit on tente avec les moyens modernes disponibles d'explorer le montage initial. Que l'on choisisse l'une ou l'autre de ces méthodes des difficultés se présentent. Dans le premier cas apparaissent les difficultés développées par Xian Chen concernant les informations nécessaires à la bonne réplication mais indisponibles. La réplication peut alors permettre d'identifier certaines de ces informations, tels que les gestes au sens d'Otto Sibum. Cependant la réplication ne saurait être considérée comme exacte tant que l'ensemble de ces données ne sont pas rassemblées. L'obstacle est alors qu'il est impossible de s'assurer que l'ensemble de ces données est réellement rassemblé, puisqu'elles le sont au cours de la manipulation, et qu'il est nécessaire que l'expérimentateur décide à un moment que l'expérience est terminée. Il est donc impossible de considérer une réplication comme étant l'exacte reproduction de l'expérience initiale. On ne doit pas pour autant considérer, sous prétexte qu'une expérience n'est jamais réellement totalement reproductible, qu'il est possible de prendre un maximum de liberté avec le montage initial. Il faut, dans la mesure du possible, se rapprocher au maximum de la mise en œuvre primordiale en tentant d'utiliser du matériel et des matériaux identiques à ceux de l'époque, et de développer une gestuelle et une pratique correspondant à celle de l'époque.

Deux cas sont alors envisageables. On peut utiliser du matériel et des matériaux d'époque, mais l'usage et le temps ont pu modifier les propriétés initiales de ces outils, sans que l'expérimentateur actuel puisse en mesurer l'impact. On peut tenter de refabriquer et reconstruire les appareils d'époque en respectant au maximum les caractéristiques initiales que l'on a pu rassembler. Le problème est alors que l'expérimentateur n'a que très peu de moyens

de s'assurer que la qualité des matériaux modernes utilisés pour la reproduction correspond à la qualité des matériaux d'époque. Les techniques de fabrication et de construction anciennes font de plus partie de ces données non textuelles dont l'expérimentateur ne fait que rarement le rapport dans ses publications, que l'on devra reconstruire lors de la réplication.

Cette situation place l'expérimentateur moderne qui souhaite répliquer une expérience ancienne devant un choix, généralement conditionné par les moyens techniques et financiers dont il dispose, qui conditionnera l'ensemble de la réplication. Si l'on choisit de reproduire et de reconstruire les appareils, on pourra considérer que l'activité de réplication débute dès cette étape, la réplication permettant alors d'apporter des informations non seulement sur le fonctionnement et l'utilisation de l'appareil mais sur sa création elle-même.

Quoi qu'il en soit, il semble clair pour l'ensemble des auteurs ayant traité le sujet, qu'il est impossible de considérer une réplication comme étant l'exacte reproduction d'une expérience historique. Son but n'étant, dans le cadre de cette recherche, pas muséologique mais exploratoire, il faudra garder à l'esprit qu'à aucun moment on ne peut affirmer une correspondance totale entre le travail de l'expérimentateur contemporain et celui de l'expérimentateur historique. Cependant nous pensons, comme Voskuhl, que ce travail peut apporter des informations essentielles à la bonne compréhension du cas étudié.

5.3. La réplication des expériences d'Edmond Becquerel

5.3.1. Le corps des appareils

Les choix que nous avons faits lors du travail de réplication des expériences d'Edmond Becquerel sont conditionnés à la fois par les objectifs que nous développons dans ce travail et par les moyens dont nous disposions.

Nous avons réalisé la construction complète des appareils eux-mêmes. En effet, les deux premiers appareils que nous avons choisis de répliquer n'ont été construits qu'une seule fois au sein du laboratoire dans lequel travaillait Edmond Becquerel, et ont probablement été modifiés ou détruits par son auteur lui-même. Les cahiers d'inventaire[144] disponibles dans son ancien laboratoire, débutés en 1864 sur ordre du Muséum d'histoire naturelle, et rédigés pour Edmond Becquerel lui-même, puisqu'il occupait le poste d'assistant de son père à la chaire de

[144] Becquerel, E. (1864). Inventaire des objets composants le cabinet de physique appliquée, Muséum national d'histoire naturelle (laboratoire de biophysique).

physique appliquée à l'époque, ne font à aucun moment mention de l'actinomètre électrochimique. On peut y trouver divers éléments ayant probablement participé à la construction de ceux-ci. L'objet numéro 123 de la rubrique « optique et géodésie » est décrit comme un « *appareil de M. Ed. Becquerel pour le dégagement de l'électricité par l'action chimique de la lumière* ». L'objet numéro 849 est un « *appareil de M. Ed. Becquerel pour les courants électriques dégagés par la lumière* ». La date d'entrée de ces objets dans le cabinet de physique n'est pas donnée. On trouve seulement la mention « *avant le 1ier janvier 1864* », date à laquelle cet inventaire est commencé. Ces objets n'ayant pas été rayés de la liste avant le 15 mars 1950, date à laquelle ce cahier est abandonné, contrairement à un grand nombre d'autres objets, il est probable qu'à cette date, ils ne soient pas sortis de l'inventaire. On peut en conclure qu'ils étaient encore présents dans le laboratoire en 1950. Ils n'y sont plus actuellement. Reproduire ces expériences, en utilisant ces instruments, nécessite donc de les reconstruire.

De même plusieurs actinomètres électrochimiques semblent avoir été construits, mais aucun d'eux n'a pu être retrouvé. La trace probable d'un de ces actinomètres électrochimiques semble se perdre en 1972 chez un brocanteur parisien qui a racheté une partie des stocks de la chaire de physique appliquée du Muséum lors de son déménagement des locaux d'origine, dans lesquels travaillait et vivait Edmond Becquerel. Il note dans son cahier d'inventaire « appareils de Becquerel, bon pour pièces »[145].

Il était donc apparemment impossible de reproduire les expériences d'Edmond Becquerel en utilisant son propre matériel. Nous avons donc décidé de reconstruire ces appareils en tentant de respecter au maximum les caractéristiques des originaux. Nous avons pour cela utilisé deux sources, les descriptions qu'il fait de ceux-ci dans ses publications, ainsi que les gravures qu'il propose parfois pour préciser son montage.

5.3.2. Le problème de l'outil de mesure

L'appareil de mesure utilisé par Becquerel est un galvanomètre à fil long, c'est-à-dire un galvanomètre avec un bobinage d'environ 30 000 tours. Les galvanomètres d'époque de ce type que nous avons pu identifier, et dont les moyens mis à notre disposition permettaient d'envisager l'usage lors de la réplication, se trouvent dans un état trop mauvais pour pouvoir

[145] Le successeur de ce commerçant à Paris nous a autorisé, après de multiples requêtes, à consulter d'anciens cahiers d'acquisition du magasin, mais nous a refusé, pour des motifs inconnus, l'autorisation de le citer nominativement ainsi que son commerce dans ce travail. Il nous a cependant semblé important de mentionner cette information, même tronquée.

être utilisés dans des conditions fiables. Ceux correspondant à un état d'utilisation rendant l'usage possible pour les manipulations étaient impossibles à se procurer avec les moyens dont nous disposions. Nous avons donc choisi d'utiliser un galvanomètre moderne, à cadre mobile, de grande sensibilité. Les caractéristiques de cet appareil, et les conditions dans lesquelles il est utilisé dans le montage d'Edmond Becquerel semblent ne pas intervenir sur les résultats expérimentaux. Ceci est d'autant plus important que tous les résultats produits par Edmond Becquerel sont donnés en degrés de déviation de l'aiguille de son galvanomètre, les caractéristiques internes de l'appareil ne modifient donc pas la grandeur comparée des résultats, qui sont donnés, comme nous l'expliquons plus haut, en valeurs relatives les unes par rapport aux autres et non en valeurs absolues.

La réplication présentée ici ne peut donc absolument pas être considérée comme une réplication à l'identique. Nous avons essayé d'être au plus près des expériences initiales, en tenant compte de l'ensemble des informations données par Edmond Becquerel dans ses publications. Il nous a toutefois fallu tenir compte des problèmes liés à l'indisponibilité du matériel, et aux limites de moyens inhérentes à notre activité. Nous pensons toutefois que la manière dont nous avons travaillé peut permettre d'apporter des informations importantes concernant à la fois des techniques de construction des appareils, mais aussi leur usage. Nous avons pu en particulier identifier des connaissances gestuelles spécifiques, au sens d'Otto Sibum.

5.3.3. La réplication des expériences

La réplication des expériences, en utilisant des instruments que nous avons reconstruits, s'est déroulée en tentant de rester au plus près des expériences initiales, en tenant compte des informations contenues dans les publications d'Edmond Becquerel. Il aurait fallu pour s'en approcher exactement, disposer des cahiers de laboratoires qu'il tenait avec précision. Après un long travail d'investigation, il nous a semblé impossible de nous procurer ces cahiers. En effet, si l'un d'entre eux, moins ancien, est conservé dans les archives manuscrites du Muséum national d'histoire naturelle[146], la très grande majorité des notes et papiers d'Edmond Becquerel s'est révélée indisponible. Il semble, selon plusieurs physiciens expérimentés travaillant dans le laboratoire dans lequel a exercé Edmond Becquerel au Muséum, qu'une grande partie de ces documents ait été détruite, ou perdue, lors de

[146] Becquerel, E. (1867). Cahier de laboratoire 1867, Museum national d'histoire naturelle.

déménagements successifs de ce laboratoire au cours des années 1970. Un antiquaire parisien[147] semble avoir récupéré une petite partie de ces documents, et même s'il a refusé de nous donner accès à la liste complète de ceux-ci, souhaitant conserver l'anonymat de ses clients, il nous a assuré n'avoir jamais eu en sa position ces cahiers de laboratoire. Nous n'avons donc pu utiliser que les sources publiées par Edmond Becquerel pour reproduire les séries d'expériences qu'il a mises en œuvre.

Nous étions conscients avant de débuter cette activité de réplication que de nombreux éléments manquaient dans ses publications, qu'il nous faudrait reconstruire pour parvenir à des résultats comparables aux siens. Notre démarche ne consiste donc pas à vérifier ou à contrôler la qualité du travail d'Edmond Becquerel mais plutôt à tenter d'en cerner mieux la dimension, la complexité, et les implications. Nous pensons que les limites de notre travail de réplication n'entament en rien cette démarche d'investigation.

Les résultats que nous a apportés ce travail de réplication, et la description de celle-ci sont détaillées dans la partie spécifique consacrée à la réplication. Nous pouvons cependant dire que cette activité nous a permis d'identifier les difficultés et la précision nécessaire à l'usage de l'actinomètre électrochimique. Elle nous a permis aussi de mettre en évidence des spécificités et des particularités dans la construction de l'appareil qui ne sont pas explicitées dans les publications. Elle nous a permis enfin de faire apparaître une cohérence profonde entre ces travaux concernant la nature de la lumière et les travaux qu'Edmond Becquerel réalisera ensuite concernant le mouvement des fluides. Nous pensons que seule la réplication que nous avons effectuée pouvait permettre d'établir un lien entre ces deux domaines d'études que lui-même ne construit pas explicitement dans ses publications.

Conclusion :

Nous avons voulu, dans cette partie, présenter les différents positionnements philosophiques auxquels nous nous référons pour analyser le travail d'Edmond Becquerel. Ceci nous a permis de cerner plus précisément la démarche qu'il poursuit, et sa conception de la pratique scientifique. Nous avons pu aussi aborder, sous un angle spécifique, ses recherches et les résultats qu'il obtient, en étudiant le rôle et la fonction de l'expérience dans sa pratique.

Nous avons, de plus, souhaité analyser, par le regard des philosophes des sciences, les rôles et fonctions des controverses scientifiques. Il nous semble, à la suite de ce travail pouvoir considérer le débat qui se déroule entre Jean-Baptiste Biot et Edmond Becquerel

[147] Il s'agit du même que précédemment.

comme une controverse. Ceci nous permet de mieux le cerner et d'en étudier les raisons, les conditions et les implications.

Nous avons enfin voulu étudier si le travail expérimental que nous avons mené pouvait être considéré comme une activité de réplication. Il nous semble qu'il en respecte les caractéristiques. Une telle position nous permet d'enrichir notre analyse des travaux de Becquerel en faisant apparaître des éléments que seule cette activité peut mettre en évidence.

Les outils d'investigation que nous employons dans ce travail, et en particulier l'analyse de la controverse et l'utilisation de la réplication semble pouvoir, au regard des auteurs étudiés dans cette partie, être justifiés et validés. Les définitions que chacun peut en donner sont le plus souvent spécifiques au cas étudié. Celui que nous exploitons ici nécessite lui aussi que nous réalisions des adaptations de leurs définitions.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons souhaité montrer, dans ce travail, les cheminements à la fois techniques et théoriques qui ont pu amener Edmond Becquerel à la construction d'un appareil, l'actinomètre électrochimique, et par son intermédiaire à une meilleure connaissance de la lumière, de sa nature, de son étendue et de ses effets.

L'étude de ce cas permet en premier lieu de faire apparaître des positionnements théoriques que nous pensons présents dans la construction de cet appareil. Ceux-ci, lors de la construction d'un instrument s'ils sont présents dans la démarche du constructeur, sont très souvent implicites, ou masqués par les aspects purement techniques.

En second lieu, nous avons souhaité mettre en évidence l'importance des connaissances techniques, concernant la photographie, qui ont été nécessaires à Becquerel pour parvenir à ces résultats. Il lui fallait connaître ses principes, et les maîtriser, pour imaginer les utiliser dans cette direction, et y parvenir avec une telle précision.

Enfin, nous avons voulu présenter comment un appareil, par ses améliorations successives et ses développements, ici en partie permis par le travail de critique et de rigueur de Biot, peut apporter des résultats confortant expérimentalement les principes de sa propre construction, et ensuite amener à des considérations théoriques sur son objet d'étude lui-même. Dans le cas de l'actinomètre électrochimique, Edmond Becquerel a pu atteindre son objectif, puisqu'il a permis d'éclairer le débat concernant la nature de la lumière d'un jour nouveau, puis de préciser le concept même de lumière, au sens des physiciens.

Le parcours professionnel d'Alexandre-Edmond Becquerel est, dès sa naissance, quasiment tracé. Deuxième fils du célèbre académicien Antoine-César Becquerel, premier d'une dynastie qui atteindra les sommets de la reconnaissance scientifique quand Henri, fils d'Edmond obtiendra le prix Nobel de physique, Edmond Becquerel porte en partie la responsabilité de la réussite sociale de sa famille. Son père, issu d'un milieu relativement modeste, et parvenu aux prix de lourds efforts et de grands sacrifices à s'élever dans l'échelle sociale, enseigne très tôt à ses descendants le goût de la réussite et de l'ascension sociale. Les acquis de la famille doivent être conservés, et renforcés, et la voie scientifique est le moyen dont il dispose pour que ses fils y parviennent. Antoine a en plus de ces considérations sociales fortes, des considérations scientifiques, méthodologiques d'importance. Il estime en

effet qu'il n'est pas possible de travailler dans le domaine de la physique de manière purement théorique, et plus encore, que le travail expérimental, les faits expérimentaux sont primordiaux face aux théories. Pour lui, rien ne sert d'élaborer des hypothèses discutables si elles ne sont pas inspirées par l'expérience. Par cette école familiale, Edmond est préparé à se construire un parcours professionnel particulier, et en tout cas assez éloigné des habitudes du milieu du XIX^{e} siècle.

En parallèle avec ses activités scientifiques, Edmond Becquerel se passionne dès sa publication pour une technique toute nouvelle, la photographie. Edmond Becquerel qui a dix-neuf ans au moment de la publication du procédé daguerréotype et appartient à la bourgeoisie parisienne, dispose des moyens sociaux et financiers nécessaires à la pratique de cette technique nouvelle. Il apprend à en maîtriser les procédés et réalise dès cette date de nombreux daguerréotypes. Jamais cette passion ne le quittera. Il sera d'ailleurs l'un des membres fondateurs de la première société de photographie en 1851.

Cette compétence particulière joue un grand rôle dans les travaux d'Edmond Becquerel, et participe au développement de ses recherches sur la nature de la lumière. Il parvient en effet à mettre en relation un savoir essentiellement technique qui concerne la photographie avec son activité d'investigation scientifique. Il fait usage des procédés photographiques, en les détournant de leur fonction initiale, puisqu'il n'obtient pas d'image, afin d'analyser les effets de la lumière sur la matière. Nous pouvons considérer que cette double compétence, à la fois scientifique et technique, est essentielle dans la réalisation de ses appareils et des expériences qu'il mène avec ceux-ci. Sa capacité à mettre en relation ces deux compétences lui permettra de mettre en œuvre la construction de trois appareils successifs, modifiant chacun d'eux, pour aboutir à la réalisation de l'actinomètre électrochimique.

Il nous faut maintenant revenir sur les questions que nous nous posions dans le début de ce travail, afin d'analyser les réponses que nous pouvons y apporter. Un élément transversal à toutes ces questions, permettant d'aborder le travail d'Edmond Becquerel, concerne sa conception méthodologique de la recherche. En effet sa formation spécifique, orientée vers le travail expérimental, sera centrale dans l'ensemble de son travail. Elle joue un rôle essentiel dans l'évolution des appareils, l'utilisation de ceux-ci, et l'exploitation de leurs résultats. Elle est centrale dans la manière dont Becquerel réagit à la controverse qui se déclenche entre lui et Biot. Cet attachement au travail expérimental lui permet enfin de mettre au point des procédés utilisant la photographie comme outil d'analyse de la lumière solaire.

La première question que nous posions était la suivante :
-comment évolue la construction d'un appareil, quelles étapes nécessite cette construction , quels facteurs permettent cette évolution ?

Plusieurs éléments qui apparaissent dans l'analyse que nous avons réalisée peuvent nous permettre de répondre à cette question, dans le cas du travail d'Edmond Becquerel. Tout d'abord, ce sont les limites techniques du premier appareil à deux phases qui conduisent Edmond Becquerel à chercher un nouveau moyen d'étudier les réactions photosensibles. En effet, cet appareil n'est fonctionnel que pour des réactions qui se produisent sous l'effet de la lumière entre deux substances liquides, ou solubles dans des liquides de densités différentes, permettant ainsi de les superposer dans le vase. Il faut, de plus, que le liquide le moins dense soit incolore et translucide, afin que la lumière puisse parvenir jusqu'à l'interface sans être trop perturbée par celui-ci. Ces difficultés ne permettent pas d'étudier un grand nombre de réactions qui se produisent sous l'effet de la lumière. Cette limite conduit Edmond Becquerel à chercher un nouveau moyen d'étudier celle-ci.

Les objections de Jean-Baptiste Biot concernant le fonctionnement de l'appareil et la réalisation expérimentale favorisent elles aussi cette évolution. Il soulève en effet des questions auxquelles l'appareil ne peut apporter aucune réponse. Afin d'étudier si la lumière produit un effet sur les plaques de platine nues, Edmond Becquerel est conduit à mettre en place le premier procédé différentiel qu'il utilisera. Ce procédé est le seul dont il dispose pour contrôler l'absence d'un effet. Il permet de construire un système symétrique dans l'obscurité, donc électrochimiquement stable, afin de vérifier si la lumière perturbe cet équilibre. De même, ce sont les objections de Biot concernant la possibilité d'un effet thermique, qui amènent Becquerel à étudier l'effet des filtres sur la lumière et les modifications du courant produit par des plaques couvertes d'une fine couche d'oxyde que cela engendre. C'est cette expérimentation qui lui permet de créer le lien entre ces travaux et les procédés daguerréotypes.

En effet, la découverte d'un effet provoqué par des plaques de platine recouvertes d'une couche d'impuretés est centrale dans l'invention de l'actinomètre. L'expérience dans laquelle il découvre ces effets est très proche, dans sa conception, de ce dernier appareil. Elle met en œuvre un procédé différentiel utilisant deux plaques identiques, dont l'une est exposée à la lumière et l'autre restant dans l'obscurité. C'est la découverte d'un artefact possible dans ces manipulations, dû à un effet de la lumière sur une plaque recouverte d'une fine couche d'impuretés qui l'amène à imaginer l'utilisation des procédés photographiques pour l'analyse

de la lumière. L'exploitation de cet artefact favorise donc l'évolution et l'amélioration des appareils.

Enfin, c'est l'utilisation de compétence spécifique concernant la photographie qui lui permet de mettre en œuvre les travaux qui l'amèneront au résultat décrit précédemment. L'utilisation de cette compétence, et la capacité que montre Edmond Becquerel à faire le lien entre deux activités relativement distinctes, la pratique de la photographie, et ses recherches sur la nature de la lumière, lui permettent d'employer les procédés de la première pour améliorer les résultats de la seconde.

Nous pensons avoir montré dans ce travail comment se déroule l'évolution des appareils construits par Edmond Becquerel. Les facteurs permettant cette évolution sont nombreux. Nous identifions particulièrement les besoins, voire la nécessité, que Becquerel a de modifier ces appareils afin de permettre d'en élargir le champ d'analyse, et de répondre aux objections de son détracteur. La capacité que montre Becquerel à exploiter des éléments spécifiques pour favoriser cette évolution est, elle aussi, essentielle. Il parvient en effet à exploiter des artefacts du montage, et à les mettre en relation avec ses autres activités, pour faire évoluer son dispositif expérimental.

La question suivante que nous posions au début de ce travail était :
-comment se déroule la migration de compétences du domaine technique vers le monde scientifique ?

Nous ne pouvons bien sûr répondre à cette question que dans le cas étudié. Cette migration de compétences est en effet ici facile à observer, puisqu'elle se produit sous l'intervention d'un seul personnage, Edmond Becquerel. C'est sa double maîtrise des procédés photographiques et du travail expérimental en physique qui permet dans ce cas le transfert de procédé du domaine technique vers le domaine scientifique. Mais c'est l'observation de phénomènes similaires, la réaction d'une substance sous l'effet de la lumière, dans des conditions similaires, puisque cette substance recouvre une plaque de métal, qui lui permet de construire le lien entre ces deux compétences. Il parvient alors à employer les procédés de la photographie pour améliorer son travail de recherche en physique.

Mais les résultats qu'il obtient grâce à l'utilisation de ces procédés permettent très rapidement de faire progresser le domaine duquel ils sont issus. L'utilisation des résultats par d'autres, tels que Gaudin qui exploite la découverte des rayons excitateurs et continuateurs, rend possible l'amélioration de la photographie, dans sa réalisation et dans la maîtrise de son fonctionnement.

Les premiers sensitomètres, qui utilisent des procédés électrochimiques pour évaluer les temps de pause sont des descendants directs de l'actinomètre électrochimique.

Le cas étudié permet donc d'observer la migration de procédés et de compétences du domaine de la photographie vers le domaine scientifique. Mais il permet aussi d'observer un effet positif en retour, puisque les résultats des recherches scientifiques d'Edmond Becquerel favorisent l'évolution de la photographie. Le transfert est ainsi bénéfique aux deux domaines.

Nous souhaitions ensuite étudier la question :
-comment aborder le contenu théorique masqué lors de descriptions purement expérimentales ? Peut-on exploiter une controverse scientifique pour atteindre ce contenu théorique masqué ?

Nous pensons qu'il est possible d'aborder le contenu théorique masqué dans un travail expérimental en analysant l'interprétation qu'en font ses contemporains. Il est particulièrement intéressant d'étudier comment réagissent les adversaires de l'auteur de travaux. Les oppositions qu'ils formulent sont généralement argumentées. Une telle prise de position nécessite en effet d'expliciter les raisons et les points de vue qui amènent des contradicteurs à refuser un résultat expérimental. C'est souvent ici qu'apparaissent des éléments qui permettent d'identifier le contenu théorique de recherche.

Nous avons abordé le contenu théorique du travail de Becquerel, pour ce qui concerne la nature de la lumière, en exploitant la controverse qui se met en place entre lui et Jean-Baptiste Biot. En effet Edmond Becquerel ne fait jamais mention dans son travail d'une quelconque orientation théorique de ces recherches. L'analyse de la controverse permet de mettre en évidence ce contenu. Les oppositions que fait Jean-Baptiste Biot au travail de Becquerel, fondées sur un désaccord théorique profond permettent par un effet miroir de comprendre les implications du travail d'Edmond Becquerel. Biot s'oppose à Becquerel parce qu'il considère que les hypothèses qu'il construit pour la réalisation de son travail vont à l'encontre d'une conception corpusculaire de la lumière. Ceci nous amène à penser que le travail de Becquerel s'inscrit dans un modèle ondulatoire.

Si l'analyse de la controverse met en évidence des implications théoriques dans les recherches d'Edmond Becquerel, dans les textes qu'il publie elles restent implicites. Il ne nous est pas possible d'affirmer que ce contenu théorique est présent dès les premiers travaux de Becquerel en 1839. Il est probable qu'il ne soit pas conscient immédiatement de l'orientation théorique de ces travaux. Il refuse en effet de prendre position. Nous pensons qu'il est

probable qu'Edmond Becquerel prenne conscience des implications théoriques de ses résultats expérimentaux sous l'effet de la controverse. C'est quand Jean-Baptiste Biot s'oppose à ses résultats et qu'il doit cerner les motifs de ces objections qu'il explicite certains points spécifiques de sa démarche. Cette explicitation, rendue nécessaire, l'amène à prendre position concernant la nature de la lumière. On peut donc considérer que la prise de position théorique d'Edmond Becquerel est en réalité le produit de la controverse que met en place Jean-Baptiste Biot.

Il est intéressant de noter que c'est cette controverse qui favorisera la progression des travaux de Becquerel et l'amènera à construire de nouveaux éléments de preuve en faveur d'une théorie ondulatoire de la lumière. C'est finalement l'engagement de Biot pour favoriser un modèle corpusculaire de la lumière qui permettra en partie d'aboutir à des résultats qui vont à l'encontre de ses objectifs.

Il nous semble que le choix d'exploiter la controverse scientifique comme un outil permettant de cerner le contenu théorique d'un travail expérimental s'est avéré productif. Nous avons au départ émis l'hypothèse que ce débat pouvait être caractérisé comme une controverse, l'utilisation de celle-ci pour l'analyse des travaux de Becquerel et les résultats que son emploi apporte nous permettent de considérer que cet outil était efficace dans le cas étudié. L'usage même que nous en faisons et l'analyse précise que cet usage a nécessité semblent permettre de confirmer que ce débat peut être qualifié de controverse.

Les dernières questions auxquelles nous souhaitions répondre lorsque nous avons commencé ce travail étaient les suivantes :

-peut-on réaliser la réplication d'instruments et d'expériences lorsque l'on ne dispose, comme source, que de textes publiés ? Que peut apporter l'activité de réplication concernant la pratique et la démarche d'un chercheur ?

Le travail que nous avons mis en œuvre pour réaliser la réplication des instruments et des expériences d'Edmond Becquerel a nécessité d'établir de nombreuses hypothèses. Il nous a fallu, à partir de l'usage qu'il fait de ces appareils et des descriptions pourtant très précises de leur conception, imaginer de nombreux éléments que les textes ne précisaient pas.

La conception même des différentes boîtes et cuves qu'emploie Edmond Becquerel pour la réalisation de ces instruments nous a amené à chercher des moyens de résoudre des problèmes d'étanchéité, de comportement des matériaux, d'organisation du dispositif expérimental. La réalisation des expériences, et en particulier l'apparition d'artefacts non décrits, nous ont amené à réaliser des modifications et des adaptations des procédés

expérimentaux afin de parvenir autant que cela était possible aux résultats qu'Edmond Becquerel annonçait. Il est très difficile de savoir si la réplication aurait été simplifiée par l'utilisation de ses carnets d'expériences et de ses notes de laboratoires. On peut penser que la découverte des artefacts de manipulation soit mentionnée dans ces documents, alors qu'elle ne l'est pas dans les publications. Les difficultés que nous avons rencontrées lors de la conception, et celles liées, lors de l'utilisation, à des défauts de conception n'apparaissent probablement nulle part. Quoi qu'il en soit, ne disposant pas de ces documents, nous avons été conduits à réaliser ces réplications en utilisant comme seules sources les documents publiés par Becquerel.

La réplication que nous avons mise en place de ces instruments et de ces expériences nous a permis de mettre en évidence plusieurs points. D'une part nous avons pu observer qu'un grand nombre de gestes et de pratiques expérimentales maîtrisées à l'époque par Edmond Becquerel et par ses contemporains n'étaient plus accessibles aujourd'hui. Il nous a fallu les reconstruire. L'usage de la chambre obscure, de l'organisation de celle-ci sont des données qu'il n'est pas nécessaire à l'époque de préciser dans les publications. La disparition de ce lieu d'expérimentation a conduit à la disparition de ses procédures d'utilisation. Il nous a fallu reconstruire des procédures d'usage de ces lieux, les modes d'organisation et de travail dans les conditions particulières qu'ils nécessitent. Nous ne considérons pas que nous ayons reconstruit l'usage de la chambre noire tel qu'il se pratiquait et se transmettait à l'époque. Nous avons reconstruit un moyen, un usage, de celle-ci afin de la rendre fonctionnelle pour les travaux que nous souhaitions y mener.

Les difficultés de réalisation des expériences, et la précision nécessaire au bon fonctionnement de celles-ci ont pu être abordées et identifiées dans la reproduction. Certains résultats qu'obtient Edmond Becquerel sont en effet restés pour nous totalement inaccessibles. Il nous a en particulier été impossible de reproduire les dernières expériences, les plus précises, qu'il réalise avec son actinomètre électrochimique. Il est probable que pour parvenir à de tels résultats l'expérimentateur doit faire preuve d'une maîtrise et d'une précision de son appareillage expérimental que le peu de temps dont nous disposions ne nous a pas permis d'acquérir.

Les caractéristiques mêmes des appareils, qui semblent pourtant extrêmement précises dans les descriptions qu'en fait Edmond Becquerel apparaissent lacunaires lorsque l'on est conduit à les reconstruire. La structure des boîtes en bois qu'il emploie, qui semblent précises à la lecture des publications, ne spécifie en réalité pas les modes d'ajustement des parois, les techniques d'étanchéification. Les méthodes employées pour s'affranchir de la présence de

tanin dans ces boîtes en bois ne sont pas précisées. Cependant, les résultats produits par les choix que nous avons faits pour résoudre ce problème semblent correspondre à certaines particularités des descriptions de Becquerel. Les boîtes, lorsqu'on leur applique le traitement par le chauffage apparaissent noircies intérieurement comme le décrit Becquerel, sans qu'il justifie de cette particularité.

Les artefacts de manipulations que nous avons pu observer lors de l'expérimentation nous ont amené à considérer les travaux d'Edmond Becquerel postérieurs sous un angle différent. Plusieurs des recherches qu'il mène, sur des sujets qui peuvent sembler distants, apparaissent directement liés à ces artefacts. L'apparition de courant lors de l'agitation du liquide dans l'actinomètre électrochimique est un artefact tout à fait étonnant, dont l'intensité est extrêmement importante. Edmond Becquerel ne mentionne pas cet artefact dans les publications décrivant l'actinomètre électrochimique. Les publications qu'il réalise près de 15 ans plus tard, traitant des courants produits lors des mouvements des liquides semblent trouver leur origine dans ce résultat. La réplication a donc permis de construire une cohérence particulière dans les travaux d'Edmond Becquerel, invisible lors de la lecture des publications.

Ce travail de réplication nous a permis, par la mise en œuvre des procédés employés par Edmond Becquerel, de mettre en évidence la proximité des techniques qu'il emploie avec celles utilisées pour la réalisation de daguerréotypes. La réplication permet donc de conforter l'hypothèse que nous émettons concernant le transfert de compétences et de procédés du domaine de la photographie dans le domaine des sciences.

Il nous semble que l'angle d'observation que nous avons développé pour analyser les travaux d'Edmond Becquerel, orienté vers l'analyse de la réalisation technique, nous a permis d'aborder ses recherches d'une manière large, et aussi complète que possible. L'exploitation systématique de ses textes, nous a permis d'étudier en détail l'évolution des appareils et les expérimentations. Associée à une activité de reproduction des expériences et des instruments, que nous pensons pouvoir qualifier de réplication, cette démarche nous a permis de mettre en évidence l'interaction forte qui existe entre ces travaux de recherche et les procédés daguerréotypes. Le cas étudié, concernant l'invention de l'actinomètre électrochimique par Edmond Becquerel, semble être un exemple de l'interaction qui peut exister entre le monde des techniciens et le monde scientifique. Cette interaction est ici mise en œuvre par un seul homme qui maîtrise ces deux domaines à la fois. Le transfert de procédés qui s'opère entre la photographie naissante et la recherche sur la nature de la lumière est extrêmement productif et riche pour les deux domaines.

L'étude du débat qui se déroule entre Jean-Baptiste Biot et Edmond Becquerel est elle aussi très riche. La manière dont il se déroule, et son objet nous permettent de le qualifier de controverse scientifique. Cette controverse porte à la fois sur un contenu purement expérimental qui oblige Edmond Becquerel à modifier son appareil pour répondre aux remarques de son contradicteur. Elle lui permet ainsi de faire évoluer ses procédés et ses instruments, et ainsi d'aboutir à la construction de l'actinomètre électrochimique. Mais cette controverse de contenu expérimental en masque une autre qui concerne des points de théorie particuliers. La discussion qui se déroule entre Biot et Becquerel s'intègre en réalité dans une controverse beaucoup plus large, quasiment résolue à l'époque concernant la nature même de la lumière. À aucun moment l'un ou l'autre des protagonistes ne prend position officiellement et explicitement dans les textes étudiés pour une conception théorique spécifique. C'est l'analyse de cette controverse qui nous a permis de le mettre en évidence.

Il nous semble donc que les outils que nous avons mis en œuvre pour réaliser l'analyse du cas particulier des travaux d'Edmond Becquerel entre 1839 et 1843 sont utiles, et nous ont permis d'aborder plus précisément le contenu de ses recherches. Il ne s'agit pas pour nous d'affirmer que l'analyse d'une controverse, d'un transfert de technologie, ou l'usage de la réplication sont des outils qui seront systématiquement efficaces pour étudier n'importe quel cas historique. Ils sont ici productifs parce qu'ils ont été adaptés au cas étudié. Nous considérons simplement que leur usage peut permettre, dans certains cas, d'explorer sous un angle spécifique le travail d'un chercheur. Les définitions de chacun de ces outils nécessitent d'être modifiées et adaptées à chacun des cas étudiés. C'est en réalisant ces adaptations que nous avons pu les rendre fonctionnels pour l'analyse des travaux d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière.

Références bibliographiques

Bibliographie

Ackermann, R. (1985). Data, instruments and theory. Princetown, Princetown university press.

Arago, F. (1839). "Le Daguerréotype." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 250-267.

Arago, F. (1842). "M. Arago rappelle qu'il signala les expériences que M. Becquerel vient de faire." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **14**: 903-904.

Babbage, C. (1830). Reflexion on the decline of science in England, and some of its causes. London, Fellowes.

Baird, D. (2004). Thing Knowledge, a philosophy of scientific instruments. Berkeley and Los Angeles, University of California press.

Baltas, A. (2000). Classifying scientific controversies. Scientific controversies, philosophical and historical perspectives. P. Machamer, M. Pera and A. Baltas. Oxford, Oxford University press**:** 40-49.

Barral, J. A. (1878). Eloge biographique de M. César Becquerel. Paris, Société nationale d'agriculture.

Becquerel, A.-C. and E. Becquerel (1855). Traité d'électricité et de magnétisme: et des applications de ces sciences à la chimie, à la physiologie et aux arts. Paris, Firmin-Didot frères.

Becquerel, A. C. (1832). "Considérations générales sur les changements qui s'opèrent dans l'état électrique des corps par l'action de la chaleur, du contact, du frottement et de diverses actions chimiques, et sur les modifications qui en résultent quelquefois dans l'arrangement de leurs parties constituantes." Mémoire de l'Académie des sciences et de l'institut de France **11**: 317-368.

Becquerel, A. C. (1839). "Réponse de M. Becquerel à M. Biot (suivi d'une remarque de M. Biot)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 172-174.

Becquerel, A. C. (1842). Traité de physique considérée dans ses rapports avec la chimie et les sciences naturelles. Paris, Firmin Didot.

Becquerel, A. C. (1845). Echange d'instruments de physique: dossier AM612, Archives du muséum national d'histoire naturelle.

Becquerel, E. (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 561-567.

Becquerel, E. (1839). "Recherche sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 145-149.

Becquerel, E. (1839). "Sur les effets électriques qui se produisent sous l'influence solaire-Lettre de M. Edmond Becquerel (suivi d'une réaction de M Biot)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 711-713.

Becquerel, E. (1840). Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire; thèse de physique présentée et soutenue à la faculté des sciences de Paris en août 1840. Paris, typographie Firmin Didot frères.

Becquerel, E. (1841). "Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière, et sur les effets électriques qui en résultent (extrait par l'auteur)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **13**: 198-202.

Becquerel, E. (1841). "Sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière et sur les effets électriques qui en résultent." Bibliothèque universelle de Genève: 136-159.

Becquerel, E. (1842). "Mémoire sur la constitution du spectre solaire." Mémoire des savants étrangers, bibliothèque universelle de Genève **40**(2): 341-367.

Becquerel, E. (1842). Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière solaire et la lumière électrique. Paris, Imprimerie royale.

Becquerel, E. (1843). "Des effets produits sur les corps par les rayons solaires." Annales de chimie et de physique **9**(3ième série): 257-322.

Becquerel, E. (1851). "Note relative aux effets électrochimiques produits sous l'influence de la lumière solaire." Annales de chimie et de physique **32**(3ième série): 176-194.

Becquerel, E. (1855). "Recherches sur les effets électriques produits au contact des solides et des liquides en mouvement." Annales de physique et de chimie **44**: 401-451.

Becquerel, E. (1864). Inventaire des objets composants le cabinet de physique appliquée, Muséum national d'histoire naturelle (laboratoire de biophysique).

Becquerel, E. (1867). Cahier de laboratoire 1867, Muséum national d'histoire naturelle.

Becquerel, E. (1868). La lumière, ses causes, ses effets. Paris, Firmin Didot Frères, fils et cie.

Becquerel, E. and A. Cahours (1840). "Recherche sur les pouvoirs réfringents des liquides." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **11**: 867-872.

Belloni J., T. M., Remita H., Keyzer R. (1999). "De Enhancement yield of photoinduced electrons in doped silver halide crystals." Nature **402**: 865-867.

Biot, J.-B. (1839). "Note de M. Biot sur le compte rendu de la dernière séance." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 579-581.

Biot, J.-B. (1839). "Remarque de M.Biot sur note lue par M. Becquerel." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 169-172.

Biot, J.-B. (1839). "Remarques sur quelques points de la théorie des radiations, en réponse à une lettre de M. E. Becquerel, lue à la dernière séance, et insérée au Compte rendu." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 719-726.

Biot, J.-B. (1841). "Nouveaux détails sur les papiers impressionnables communiqués à M. Biot par M. Talbot." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 225-227.

Biot, J.-B. (1841). "Persistance de l'excitabilité spéciale, dans les papiers imprégnés de bromure d'argent qui ont été impressionnés instantanément." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 170-171.

Biot, J.-B. (1846). Sur les modifications qui s'opèrent dans le sens de la polarisation des rayons lumineux lorsqu'ils sont transmis a travers des milieux solides ou liquides soumis à des influences magnétiques très puissantes. Paris, Imprimerie Royale.

Biot, J.-B. (1860). Introduction aux recherches de mécanique chimique dans lesquelles la lumière polarisée est employée auxiliairement comme réactif. Paris, Mallet-Bachelier.

Biot, J.-B., F. Arago, et al. (1841). "Rapport sur un mémoire de M. Edmond Becquerel, intitulé: Recherches sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire, et la lumière électrique." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 101-112.

Blondel, C. (1994). Becquerel Edmond (1820-1891), professeur de physique appliquée aux arts (1852-1891). Les professeurs du conservatoire des arts et métiers, dictionnaire biographique 1794-1955. C. Fontanon and A. Grelon. Paris, Institut national de recherche en pédagogie et Conservatoire nationale des arts et métiers. **1:** 168-182.

Bouguer, P. (1757). "Remarques sur les moyens de mesurer la lumière et sur quelques applications de ces moyens." Mémoire de l'Académie royale des sciences" Centurie II, Tome 15: 1-35.

Buchwald, J. Z. (1989). "The battle between Arago and Biot over Fresnel." Journal of optics **20**(3): 109-117.

Chen, X. (1994). "The rule of reproductibility and its applications in experiment appraisal." Synthese **99**: 87-109.

Collins, H. M. (1992). Changing order, replication and induction in scientific practice. Chicago, University of Chicago press.

Egoroff, N. (1876). "Electro-actinomètre différentiel." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **82**: 1435-1438.

Figuier, L. (1870). La photographie. Les merveilles de la science ou Description populaire des inventions modernes. Paris, Furne, Jouvet et cie éditeurs. **3:** 1-208.

Fatet J., Viard J. (2004), « La naissance de la spectrométrie : L'actinomètre électrochimique d'Edmond Becquerel », Physis, rivista internazionale di storia della scienza, 41(1), 167-182 .

Fox, R. (1974). "The rise and fall of Laplacian physics." Historical studies in the physical sciences **4**: 89-136.

Franklin, A. (1986). The neglect of experiment. Cambridge, Cambridge university press.

Fresnel, A. (1866-1870). Oeuvres complètes. Paris, Susse Frères Editeurs.

Freudenthal, G. (2000). A rational controversy over compounding forces. Scientific controversies, philosophical and historical perspectives. P. Machamer, M. Pera and A. Baltas. Oxford, Oxford University press**:** 125-142.

Galison, P. (1987). How experiments end. Chicago, University of Chicago press.

Gaudin (1841). "Application des propriétés des rayons continuateurs aux opérations de la photographie." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 862-863.

Gaudin (1841). "Supériorité des rayons jaunes comme rayons continuateurs dans les opérations photographiques." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **12**: 1060.

Hacking, I. (1981). "Do we see through a microscope." Pacific philosophical quarterly **63**: 305-322.

Hacking, I. (1999). The social construction of what? Cambridge, Cambridge university press.

Hentscel, K. (2002). Mapping the spectrum, technique of a visual representation in research and teaching. Oxford, Oxford university press.

Johnston, S. F. (2001). A history of light and colour measurement, Sience in the shadows. Bristol and Philadelphia, Institute of physics publishing.

Lemartin de Raspide, S. (2000). Une continuité lignagère: les Becquerels au XIXième siècle et au début du XXième siècle. Histoire contemporaine. Paris, Université Paris IV-Sorbonne**:** 421.

Limoges, C. (1980). The developpement of the Muséum d'Histoire Naturelle of Paris 1800-1914. The organization of Science and technology in France (1800-1914). R. Fox and G. Weisz. Paris, Cambridge**:** 211-240.

Mamiani, M. (2000). The structure of a scientific controversy. Scientific controversies, philosophical and historical perspectives. P. Machamer, M. Pera and A. Baltas. Oxford, Oxford university press**:** 143-152.

Mc Kinney, W. (1992). "Pausibility and experiment:Investigations in the context of pursuit." History and phlosophy of science.

Perrin, F. H. (1948). "Whose absorption law?" Journal of the optical society of america **38**: 72.

Pestre, D. (1994). La pratique de reconstitution des expériences historiques, une toute première réflexion. Restaging Coulomb: usages, controverses et réplications autour de la balance de torsion. C. B. a. M. Dörries. Firenze, Leo S. Olschki**:** 17-30.

Pickering, A. (1989). Living in the material world. The use of experiment, studies in the natural sciences. T. P. a. S. S. David Gooding. Cambridge, Cambridge university press**:** 275-298.

Popper, K. (1973). Logique de la découverte scientifique. Paris, Payot.

Sibum, O. (1994). "Reworking the mechanical equivalent of heat: instruments of precision and gestures of accuracy in early victorian England." Studies in the history and the philosophy of science(26): 73-106.

Steinle, F. (1994). Experiment, Speculation, and Law: Farady's analysis of Arago's wheel. 1994 biennal meeting of the philosophy of science association, East lansing, Michigan, Philosophy of science association.

Talbot, F. (1834). "Experiments on light." Philosophical magazine **5**: 321-334.

Thompson, B. (1794). "A method of measuring the comparative intensities of the light emitted by luminous bodies." Philosophical transactions of the Royal society of London **84**: 67-82.

Tobin, W. (2002). Léon Foucault. Paris, EDP Sciences.

Voskuhl, A. (1997). "Recreating Herschel actinometry: an essay in the historiography of experimental practice." British journal for the history of science **30**: 337-355.

Annexes

Annexes

Il n'est bien sûr pas question de faire figurer en annexe de ce travail l'ensemble du corpus que nous avons exploité. Nous avons toutefois souhaité que soient présents les textes parus dans les comptes rendus de l'Académie des sciences qui font état de la controverse qui se déroule entre Jean-Baptiste Biot et Edmond Becquerel. Nous joignons donc les textes de ces deux auteurs.

Date de la communication	*Publication dans les comptes-rendus de l'Académie des sciences*
Lundi 30 juillet 1839	***Becquerel, E**. (1839). "Recherche sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 145-149.*
Lundi 5 août 1839	***Biot, J.-B.** (1839). "Remarque de M.Biot sur note lue par M. Becquerel." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 169-172.*
Même séance	***Becquerel, A.** (1839). "Réponse de M. Becquerel à M. Biot (suivi d'une remarque de M. Biot)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 172-174.*
Même séance	***Biot, J. B.,** après avoir entendu les réflexions de M. Becquerel fait remarquer qu'elles ne lui semblent pas du tout répondre aux objections qu'il a faites.*
Lundi 4 novembre 1839	***Becquerel, E.** (1839). "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 561-567.*
Lundi 11 novembre 1839	***Biot, J.-B.** (1839). "Note de M. Biot sur le compte rendu de la dernière séance." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 579-581.*
Lundi 25 novembre 1839	***Becquerel, E.** (1839). "Sur les effets électriques qui se produisent sous l'influence solaire- Lettre de M. Edmond Becquerel " Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **9**: 711-713.*

Même séance	***Biot J. B.*** *dit « qu'il regrette de ne pas pouvoir partager les idées théoriques qu'elle (cette lettre) renferme.*
Lundi 2 décembre 1839	***Biot, J.-B.*** *(1839). "Remarques sur quelques points de la théorie des radiations, en réponse à une lettre de M. E. Becquerel, lue à la dernière séance, et insérée au Compte rendu." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* ***9****: 719-726.*
Lundi 16 mars 1840	***Becquerel, E.*** *(1840). "Note sur un papier impressionnable à la lumière, destiné à reproduire les dessins et les gravures." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* ***10****: 469-471.*
Lundi 2 novembre 1840	***Becquerel, E.*** *(1840). "Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière solaire et la lumière électrique (extrait par l'auteur)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* ***11****: 702-703.*
Lundi 23 novembre 1840	***Becquerel, E.*** *and A. Cahours (1840). "Recherche sur les pouvoirs réfringents des liquides." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* ***11****: 867-872.*
Lundi 11 janvier 1841	***Biot, J.-B****.,* ***F. Arago****, et al. (1841). "Rapport sur un mémoire de M. Edmond Becquerel, intitulé: Recherches sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire, et la lumière électrique." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* ***12****: 101-112.*
Lundi 18 janvier 1841	*Biot, J.-B. (1841). "Persistance de l'excitabilité spéciale, dans les papiers imprégnés de bromure d'argent qui ont été impressionnés instantanément." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences 12: 170-171.*
Lundi 26 juillet 1841	***Becquerel, E.*** *(1841). "Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière, et sur les effets électriques qui en résultent (extrait par l'auteur)." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* ***13****: 198-202.*
Lundi 13 juin 1842	***Becquerel, E.*** *(1842). "Mémoire sur la constitution du spectre solaire." Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* ***14****: 901-905.*

COMPTE RENDU

DES SÉANCES

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU MARDI 30 JUILLET 1839.

PRÉSIDENCE DE M. CHEVREUL.

MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS
DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE.

M. le **Président** annonce la perte douloureuse que l'Académie vient de faire dans la personne d'un de ses membres, M. **de Prony**, décédé le 29 juillet 1839.

MÉMOIRES LUS.

ÉLECTRO-CHIMIE. — *Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques; par* M. **Edmond Becquerel**. (Extrait par l'auteur.)

« On a étudié jusqu'ici les radiations particulières émanées d'un faisceau lumineux qui réagissent sur les éléments des corps pour opérer leur combinaison ou leur séparation, seulement sur un petit nombre de substances comme le chlorure d'argent, la résine de gaïac et quelques autres. On sait que ces radiations, connues sous le nom de radiations chimiques, rayons chimiques, sont soumises aux mêmes lois physiques de la réflexion, de la réfraction, et même de la polarisation que les rayons lumineux dont elles font partie. Ces radiations peuvent exister dans toutes les parties du spectre, et dans chaque expérience nous nommerons radiations chimiques, celles qui affectent les substances dont nous ferons usage.

» Parmi les corps qui sont altérés par la lumière, on a remarqué que le

plus grand nombre renferment du chlore, du brome ou de l'iode. L'action de ces corps sur l'hydrogène est telle, et principalement celle du chlore, que partout où un composé peu stable de chlore est en présence d'une combinaison hydrogénée sous l'influence des rayons chimiques, le chlore tend à s'emparer de l'hydrogène pour former de l'acide chlorhydrique. Mais, en général, on manque de procédés physiques pour reconnaître l'action de deux substances, l'une sur l'autre, sous l'influence de la lumière; car dans beaucoup de cas cette combinaison s'effectuant dans un temps très long et sans changement de couleur, on ne peut reconnaître l'influence des rayons chimiques d'après les produits formés.

» Ces diverses réactions s'effectuant de molécule à molécule, on n'a pu encore obtenir des courants électriques dans la combinaison ou la séparation de deux éléments sous l'influence des rayons chimiques; cependant, si l'on pouvait observer ces courants, on aurait un moyen de reconnaître et d'étudier la réaction de diverses substances, les unes sur les autres, sous l'influence de ces rayons.

» Tel est le problème que j'ai résolu à l'aide du procédé suivant : Deux liquides d'inégale densité, conducteurs de l'électricité, étant superposés l'un sur l'autre dans un vase, si l'un des liquides renferme une substance capable de réagir sur une autre qui se trouve dans le second liquide, sous l'influence de la lumière, dès l'instant où l'on fera pénétrer dans la masse la radiation chimique, ils réagiront l'un sur l'autre à la surface de séparation, en produisant un courant électrique qui sera accusé par un galvanomètre, dont les deux extrémités sont terminées par deux lames de platine plongeant dans chaque liquide.

» On sait très bien que l'éther, dans lequel on a dissous du perchlorure de fer, se décolore à la lumière; en laissant continuer l'action pendant un certain temps, il y a production de cristaux jaunâtres qui n'ont pas encore été examinés; j'ai voulu savoir aussi comment se comporte une dissolution de perchlorure de fer dans l'alcool sous l'influence de la lumière: cette dissolution, au bout de plusieurs jours, se décolore et laisse précipiter de l'oxide de fer. En examinant le liquide, on trouve que le perchlorure de fer est passé à l'état de protochlorure, et qu'une portion du chlore a réagi par conséquent sur l'hydrogène de l'alcool, sous l'influence des rayons chimiques.

» Le perchlorure de fer réagissant sur l'alcool, j'ai pris pour les deux liquides d'inégale densité, une dissolution concentrée de perchlorure de fer dans l'eau, et de l'alcool du commerce que j'ai mis dans un vase cy-

lindrique noirci à l'extérieur, lequel a été placé dans un jardin entouré de murs. Des fils de platine établissaient la communication entre les lames de même métal, plongeant chacune dans un des deux liquides, et les deux extrémités d'un galvanomètre à fil long, très sensible, placé dans une chambre à quelque distance de l'appareil. Dans le premier instant il y eut un courant produit par la simple réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre: le perchlorure prit l'électricité positive, et l'alcool la négative; mais, peu à peu le courant diminua et l'aiguille redevint stationnaire au bout de quelque temps. On avait eu le soin de placer devant l'appareil, un écran opaque afin d'empêcher l'accès de la radiation dans l'intérieur. Aussitôt que cet écran fut enlevé, la radiation chimique qui accompagne la lumière pénétra dans la masse liquide, et la réaction commença immédiatement. Mais comme le chlore, dans sa réaction sur l'hydrogène, prend l'électricité positive, et que déjà le perchlorure était positif dans le premier courant, l'intensité de ce dernier fut augmentée aussitôt; la déviation de l'aiguille aimantée fut de 10 à 12° sous l'influence des rayons solaires directs.

» En général, nous avons remarqué que tous les chlorures qui peuvent passer à un état de chloruration moindre, comme le perchlorure de fer, le bichlorure de cuivre, le bichlorure d'étain, le chlorure de chaux, agissent sur l'alcool sous l'influence de la lumière, tandis que nous n'avons pu avoir de courants sensibles avec les protochlorures.

» On peut, au moyen des courants électriques, rendre sensible l'action des perchlorures sur l'esprit de bois et sur l'éther. La décomposition de l'eau par le brome et la formation de l'acide bromhydrique sous l'influence des rayons chimiques, donnent naissance également à un courant électrique. Quant au chlore, il n'en est pas de même; le courant initial est trop énergique pour que l'on puisse directement observer l'effet de la radiation chimique. Il faut auparavant faire passer dans le galvanomètre un courant égal et dirigé en sens inverse de celui qui est produit par l'action de la dissolution de chlore sur l'eau; alors l'aiguille du galvanomètre étant au zéro, sous l'influence des rayons chimiques, le chlore réagit sur l'eau et l'augmentation du courant peut être reconnue.

» Ayant remarqué qu'en plaçant devant l'ouverture du vase dans lequel étaient placés les liquides, des écrans de diverse nature afin de forcer la radiation chimique à les traverser, la déviation de l'aiguille aimantée, par première impulsion, n'était jamais la même, et était plus ou moins grande suivant la nature de ces mêmes écrans; nous avons cherché à

déterminer leur influence sur la radiation chimique en opérant d'abord avec des écrans de même nature, mais d'épaisseur différente. Nous avons reconnu que la radiation chimique, de même que la radiation calorifique, après avoir traversé un écran d'une certaine substance, traverse plus facilement un écran de la même substance, ou en d'autres termes qu'à partir d'une certaine épaisseur, différente probablement pour chaque corps, la radiation chimique n'éprouve plus ensuite d'altération, quelle que soit l'épaisseur de l'écran.

» Il était important de reconnaître comment les couleurs modifiaient la radiation chimique; nous avons opéré en conséquence avec des écrans de verre coloré. Voici l'ordre des écrans pour laisser passer la radiation chimique :

Écrans.	Rayons colorés qui traversent les verres.	Nombre des rayons chimiques qui traversent les écrans, en représentant par 100 le nombre des rayons incidents.
Verre blanc (*a*)...	blanc.	60,5
Verre violet (E)...	rouges, violets, peu de rayons... { orangés, jaunes, bleus }	41,4
Verre bleu (D)...	rouges, verts, bleus, peu de rayons { indigo, violet }	25,8
Verre vert (C)...	vert, peu de rayons. . . . . { orangés, jaunes, bleus }	insensible.
Verre jaune (B)...	rouge, orangé, jaune, vert.	0
Verre rouge (A)...	rouge.	0

» Nous avons aussi recherché dans quels rapports la radiation chimique était arrêtée en traversant des écrans de nature différente; nous sommes parvenus aux résultats suivants :

Noms des écrans.	Nombres des rayons chimiques qui les traversent.
Cristal de roche enfumé.	79,4
Verre blanc (*a*)	58,6
Plaque épaisse et striée de chaux sulfatée blanche .	58,5
Mica incolore { dont l'épaisseur est $0^{mm},07$.	76,9
Mica incolore { dont l'épaisseur est $0^{mm},52$	37
Papier de gélatine.	42,5.

» On ne doit pas regarder le nombre 58,5 trouvé pour la chaux sulfatée, comme relatif à la chaux sulfatée limpide, car la plaque que nous avons employée était remplie de stries et n'était que translucide; pour une plaque limpide ce nombre aurait été plus considérable.

» Madame de Sommerville d'abord, puis M. Biot, avaient montré que le papier sensible préparé avec le chlorure d'argent était inégalement influencé quand on le présentait à la lumière solaire sous différents écrans ; mais actuellement, à l'aide du procédé précédemment indiqué, on n'aura plus besoin de comparer les teintes diverses du chlorure d'argent pour juger de l'effet des moyens chimiques, puisque cet effet sera mesuré par l'intensité du courant électrique produit dans l'action de la lumière sur les parties constituantes des corps.

» D'un autre côté, les travaux de mon père et de M. Biot, ont montré que la radiation phosphorogénique de la lumière électrique et de la lumière solaire, différente de la radiation calorifique et lumineuse, pouvait être en partie arrêtée par des écrans de nature différente. On reconnaît, à l'inspection des tableaux précédents, que l'ordre des substances qui se laissent traverser par la radiation chimique est le même que pour la radiation phosphorogénique; mais leur intensité d'action ne paraît pas être la même pour la radiation phosphorogénique émanée de la lumière électrique, attendu que le verre arrête une très grande portion de cette dernière, tandis que le cristal de roche en laisse passer la plus grande partie.

» Quoi qu'il en soit, il paraît exister des rapports entre la radiation phosphorogénique et la radiation chimique, rapports que j'étudie et que je ferai connaître dans un prochain Mémoire. »

CHIMIE VÉGÉTALE. — *Extrait d'un Mémoire sur les ligneux ; par* M. **Payen**. (Extrait par l'auteur.)

(Commissaires, MM. Dumas, Robiquet, Pelouze, Ad. Brongniart.)

« Dans des recherches dont j'ai communiqué précédemment les résultats à l'Académie, j'ai eu l'occasion de reconnaître que toutes les formations végétales naissantes ou très jeunes, contiennent une forte proportion de substance azotée; que la substance propre des membranes, constituant les utricules et le tissu cellulaire, offre une composition identique dans diverses plantes, et que dans les parties devenues ligneuses avec l'âge il existe deux substances chimiquement distinctes : les membranes souples et les incrustations dures.

» Mes nouvelles recherches montrent que non-seulement les utricules très jeunes, à parois excessivement minces, et les tissus cellulaires, offrent une composition identique, mais qu'il en est encore de même pour les membranes plus ou moins épaisses des tissus vasculaires, des cellules qui enveloppent

COMPTE RENDU

DES SÉANCES

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU LUNDI 5 AOUT 1839.

PRÉSIDENCE DE M. CHEVREUL.

MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS
DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE.

Remarques de M. **Biot** *sur la Note lue par* M. **Becquerel**, *à la dernière séance.*

«La Note que M. Becquerel a lue, à la dernière séance, sur l'influence chimique des radiations, ayant été imprimée dans le *Compte rendu*, sans que les expériences qu'elle énonce fussent soumises à l'appréciation de l'Académie, il m'a semblé nécessaire de présenter ici quelques remarques, moins sur les faits qui s'y trouvent rapportés, que sur les conséquences que l'auteur en tire, afin de prévenir des inexactitudes d'interprétation, qui pourraient donner une direction fausse aux recherches des physiciens, dans une carrière si riche, mais si nouvelle encore.

» Le pouvoir chimique des radiations, tant célestes que terrestres, se manifeste par des phénomènes de combinaison et de décomposition, qui s'opèrent sous son influence, tandis qu'ils sont très faibles, ou insensibles dans les mêmes circonstances, lorsqu'on ne le fait pas agir. On pourrait encore soupçonner que, dans certain cas, son action consisterait à rendre seulement certains principes des combinaisons, plus sensibles à d'autres agents physiques ou chimiques; mais ce point de vue plus général nous sera probablement bientôt dévoilé.

» Or, toute modification chimique est accompagnée d'un développement d'électricité, qui même est peut-être indispensable pour qu'elle s'opère. Les appareils qui accusent un tel développement pourront donc être employés, comme indicateurs du pouvoir qui l'excite, si on les applique comparativement quand il s'exerce et quand il ne s'exerce pas. Telle est, je crois, l'idée fondamentale du travail dont on nous a lu l'extrait. Elle est ingénieuse; et elle donnera sans doute des indications utiles, dans les cas où l'on en pourra réaliser exactement l'application.

» Mais des appareils *indicateurs* ne sont pas nécessairement des *mesureurs*. Tout effet résultant d'une cause physique ne lui est pas pour cela proportionnel. Il est même très rare qu'il le soit, quand il n'en dérive pas immédiatement, et que l'agent lui-même est complexe, comme le sont certainement les radiations. Or, l'auteur du Mémoire me semble supposer cette proportionnalité, entre la quantité des radiations, et l'intensité des forces magnétiques développées tandis que leur influence s'exerce; du moins à en juger par les rapports absolus qu'il assigne, entre les nombres de rayons actifs incidents et transmis par des écrans donnés.

» Lorsque M. Melloni voulut déterminer ces rapports pour les rayons calorifiques, en les concluant du pouvoir magnétique qu'ils excitaient par leur incidence sur les surfaces extrêmes d'une pile thermo-électrique, enduite de noir de fumée, il constata d'abord, par des expériences nombreuses et très précises, que le pouvoir excité était exactement proportionnel au nombre des rayons incidents, quelle que fût leur nature et celle de la source dont ils sortaient. Il détermina ensuite la proportion numérique de ces rayons qui étaient réfléchis par les surfaces, tant antérieures que postérieures, des écrans interposés perpendiculairement dans leur trajet, et ce fut seulement après avoir établi ces données fondamentales qu'il put réellement mesurer avec certitude les quantités absorbées dans la transmission, comme aussi démêler les diverses natures des filets calorifiques qui s'éteignaient ainsi dans chaque écran à des épaisseurs diverses. On peut voir dans ses Mémoires, et dans le Rapport de l'Académie, par combien d'épreuves sévères toutes ces choses furent prouvées, et comment les quantités ainsi que les qualités des rayons absorbés ou transmis, purent s'en déduire avec une rigueur mathématique. Un pareil travail devra inévitablement précéder toute mesure exacte des radiations par les quantités d'électricité ou de force magnétique développées dans les effets chimiques qu'elles excitent; et ce travail y sera infiniment plus difficile, à cause de la diversité des corps impressionnés, à cause de l'action complexe, sou-

vent opposée, exercée sur eux par les divers filets d'une même radiation incidente; enfin à cause des variations accidentelles auxquelles la radiation solaire ou atmosphérique est sujette, tandis que M. Melloni employait une source calorifique d'intensité presque constante, qu'il achevait de rendre idéalement telle par la succession régulièrement alternée de ses opérations, et qu'en outre les radiations émanées de cette source, quoique hétérogènes entre elles, agissaient dans un même sens, et avec un même pouvoir calorifique, sur les surfaces noircies de son appareil mesureur.

» Pour donner une idée de ces complications d'action, qu'il faudra démêler avant de pouvoir mesurer les quantités relatives des radiations par les effets électriques qu'elles excitent, supposons que l'on opère sur un papier jauni par le gaïac. Vous pourrez l'exposer à la radiation solaire directe, dans des conditions tellement combinées, qu'il y semblera tout-à-fait insensible, parce que les filets de cette radiation qui excitent l'apparition de la substance bleuissante, seront exactement balancés par les filets congénères, ou artificiellement ajoutés, qui la dissipent à mesure ou la maintiennent en combinaison. Mais présentez-le à la radiation diffuse venant du nord : ces derniers filets n'y existeront plus qu'en proportion beaucoup moindre; l'énergie des premiers deviendra dominante, et le papier bleuira rapidement. Il faudra donc avoir analysé ces différences survenues dans la nature de l'action pour conclure, dans chaque cas, le nombre des rayons actifs qui ont produit la résultante magnétique observable.

» Mais la radiation diffuse elle-même est complexe et contient des éléments qui agissent sur certaines substances en sens opposé; de sorte qu'elle les impressionne moins fortement par son action directe à travers l'air, qu'étant tamisée par des écrans qui absorbent un des deux systèmes plus abondamment que l'autre. J'avais remarqué cet accroissement dans l'excitation de la phosphorescence à travers des plaques d'eau distillée, laquelle paraissait ainsi plus vive qu'à travers l'air seul. Un chimiste aussi inventif qu'exact, M. Malaguti, vient de trouver que l'interposition des plaques d'eau produit un effet analogue sur le papier sensible préparé par le chlorure d'argent. Le nombre des rayons transmis, directement et à travers l'écran, s'apprécierait donc alors bien mal par l'intensité du pouvoir magnétique que leur résultante développe, puisqu'il semblerait moindre dans l'action directe que dans l'action transmise à travers l'écran. Une telle opposition ne se présente jamais quand on étudie les rayons calorifiques par la pile enduite de noir de fumée; leur action est

toujours de même sens quelle que soit leur nature, et elle est proportionnelle à leur somme, deux circonstances qui en facilitent singulièrement l'observation et l'appréciation en nombres.

» Par les motifs que je viens d'exposer, l'auteur de la Note me semble ne s'être pas exprimé avec exactitude lorsqu'il a dit que désormais *l'effet chimique des radiations sera mesuré par l'intensité du courant électrique produit dans l'action de la lumière sur les parties constituantes des corps.* Mais en considérant ce procédé comme un simple indicateur de différences, il pourra être souvent très utile, puisqu'il exprimera exactement un caractère propre à la résultante complexe de l'action totale. Par exemple, l'auteur a très bien pu l'employer ainsi pour déterminer l'épaisseur de chaque écran au-delà de laquelle la radiation transmise devient sensiblement homogène pour cet écran-là. Toutefois, l'énoncé de ce fait, tel que l'auteur le donne, me paraît encore être légèrement inexact en deux points : le premier, en ce qu'il omet les pertes occasionées par les réflexions qui auraient dû lui être sensibles si ses comparaisons eussent été tout-à-fait précises; le second, c'est qu'il a dit avoir *reconnu* la constance définitive de la transmission au-delà d'une certaine épaisseur des plaques, au lieu qu'il aurait dû seulement dire qu'il l'avait *vérifiée.* Car cette constance résultant de l'épuration progressive de la radiation est un des premiers faits que l'on a pris soin d'établir dans les *Comptes rendus* de cette année, en correspondance avec la marche suivie par M. Melloni; et il y est énoncé textuellement dans le numéro 8, page 263. Ce furent même des expériences de ce genre, faites par M. Daguerre avec des verres blancs d'épaisseurs diverses, qui, communiquées à l'auteur de la présente Note, lui permirent d'affirmer à cet illustre artiste, dès la première vue de ses tableaux chimiques, que ce n'était pas la lumière, mais un élément congénère compris dans la radiation totale, qui les produisait. »

Réponse de M. **Becquerel** *à* M. Biot.

« Le procédé indiqué par M. Edmond Becquerel pour déterminer et mesurer l'action chimique que la lumière exerce au contact de certaines dissolutions, consiste à mettre deux de ces dissolutions, superposées l'une sur l'autre, en relation avec un multiplicateur très sensible, au moyen de deux lames de platine. Des l'instant que la réaction chimique commence, il en résulte un courant électrique dont l'intensité est proportionnelle à l'énergie avec laquelle s'exerce cette réaction.

» Cette proportionnalité n'existe ordinairement dans les actions chimiques, ce qui est le cas ici, que lorsque les deux lames ne sont pas attaquées par les solutions, et quand la conductibilité de la portion liquide du liquide ne change pas. Or, la réaction étant ici très lente, le mélange des liquides l'est également, et par conséquent la conductibilité dans un temps très court ne change pas.

» Une preuve que le courant reste constant, c'est que dans une expérience où le perchlorure de fer et l'alcool étaient en présence, l'aiguille aimantée fut chassée à 10°, à l'instant où la lumière traversa les deux liquides. Un quart d'heure après, l'expérience ayant été recommencée, la déviation fut encore la même. Certes, si le mélange des deux liquides eût eu lieu tumultueusement, on n'aurait pas eu un accord aussi parfait dans les résultats.

» On voit donc que dans l'appareil dont il est question, l'intensité du courant peut mesurer exactement l'énergie de l'action chimique de la lumière.

» S'il existe dans la lumière des radiations ou rayons chimiques qui produisent des effets coutraires, lesquels donneraient naissance à des courants dirigés en sens inverse, on ne peut se refuser d'admettre que les résultats obtenus dans les expériences de mon fils, ne puissent servir à mesurer la résultante de ces effets.

» Je ferai remarquer encore à M. Biot que, dans les liquides qui ont été soumis à l'expérience, il ne pouvait y avoir, sous l'influence de la lumière, qu'une seule réaction, celle de l'hydrogène sur le chlore. Dès-lors, l'effet n'étant pas complexe, il était inutile, je crois, de s'occuper des différentes radiations chimiques qui peuvent exister dans la lumière, lesquelles compliquent singulièrement les effets produits.

» Au surplus, on ne peut nier que les effets obtenus ne puissent servir de mesure à la résultante des effets chimiques de la lumière et par suite à la résultante du nombre de rayons chimiques en action. »

« Après avoir entendu les réflexions de M. *Becquerel*, M. **Biot** fait remarquer qu'elles ne lui semblent pas du tout répondre à l'objection qu'il a faite. Cette objection ne porte pas sur la mesure des effets chimiques par le galvanomètre; mais sur ce que la radiation solaire, ou atmosphérique, étant composée de rayons hétérogènes, qui agissent quelquefois en sens contraires, un effet produit par leur somme totale, n'est pas proportionnel à leur nombre, et ne peut conséquemment pas l'indiquer. »

M. D'Hombres-Firmas adresse quelques fragments d'*os fossiles* qu'il a trouvés aux environs d'Alais, dans une localité déjà signalée par lui comme contenant en abondance des débris de cette sorte. Ceux qu'il avait rencontrés jusqu'ici se présentaient à la surface du sol réduits en fragments trop petits et trop confondus entre eux pour qu'il fût facile de déterminer les espèces auxquelles ils avaient appartenu. M. D'Hombres-Firmas soupçonna que ces os, trouvés au milieu de champs labourés, provenaient de la couche d'argile superposée aux bancs de marne crayeuse, couche qui en cette localité forme la superficie du sol et est chaque année bouleversée par la charrue. Il dirigea, en conséquence, ses recherches vers des points où cette couche n'avait point encore été remuée, et c'est en effet dans un de ces points restés vierges qu'il a trouvé deux portions d'os qu'il adresse aujourd'hui à l'Académie; ces os étaient brisés en plusieurs fragments, mais les fragments avaient conservé leur position assez bien pour qu'on pût rapprocher les pièces correspondantes de manière à ne conserver aucun doute sur leurs véritables rapports.

Ces fragments, sur la demande de M. D'Hombres-Firmas, sont renvoyés à l'examen d'une Commission composée de MM. de Blainville, Flourens et Cordier.

MÉMOIRES LUS.

Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires; par M. Edmond Becquerel.

§ 1^er^. *Action de la radiation sur les lames métalliques.*

« Dans le dernier Mémoire que j'ai eu l'honneur de présenter à l'Académie, dans sa séance du lundi 29 juillet 1839, je me suis attaché à mettre en évidence, à l'aide des courants électriques, les réactions chimiques qui ont lieu au contact de deux liquides, sous l'influence de la lumière solaire. Le procédé que j'ai employé nécessitait l'emploi de deux lames de platine, en relation avec les deux extrémités du fil d'un multiplicateur très sensible et qui plongeaient chacune dans une des dissolutions superposées. Or comme ces deux lames éprouvaient elles-mêmes les effets de la radiation, il a dû en résulter des phénomènes composés, dont je vais m'occuper dans ce nouveau Mémoire. On sera à même ensuite de faire la part de chacun des effets produits.

» Quand deux lames de platine parfaitement propres, mais d'inégale température, sont plongées dans un liquide, il y a aussitôt production d'un courant électrique; et que le liquide soit de l'eau ou de l'eau alcaline, le courant est tel, que la lame échauffée prend au liquide l'électricité négative; le contraire a lieu quand on emploie pour liquide conducteur de l'eau acidulée. Comme le même phénomène se produit quand on expose inégalement à la radiation solaire deux lames de platine ou d'or plongeant dans une solution acide, neutre, ou alcaline, il est important de reconnaître jusqu'à quel point la radiation calorifique intervient dans la production du phénomène. Pour observer les effets de la radiation solaire, on prend une boîte en bois noircie intérieurement et divisée, au moyen d'une membrane très mince, en deux compartiments, que l'on remplit de la solution d'essai. Dans chacun de ces compartiments, on plonge une lame de platine après l'avoir chauffée préalablement au rouge; les lames de platine sont mises en communication avec un excellent multiplicateur à fil long, et l'on recouvre enfin chaque compartiment avec une planchette, afin d'intercepter l'action de la lumière solaire. Quand on veut opérer, on enlève successivement chacune d'elles.

» J'ai d'abord recherché l'ordre des écrans diversement colorés, par rapport à la radiation solaire qui agit sur les lames de platine, afin de pouvoir le comparer à l'ordre de ces mêmes écrans par rapport à la radiation calorifique solaire, qui agit sur une pile thermo-électrique. Cet ordre est complétement différent; il nous suffira de citer un verre jaune, qui est très diathermane et qui intercepte complétement toute action de la lumière solaire sur les lames de platine.

» M. Melloni a montré que les rayons calorifiques de réfrangibilité différente étaient inégalement absorbés par un écran d'eau d'un millimètre d'épaisseur, et que la perte était en raison inverse de la réfrangibilité; mais, comme dans les expériences précédentes, les rayons solaires avant de frapper les lames de platine, traversaient une couche liquide, j'ai voulu mettre la pile thermo-électrique dans la même position relative que les deux lames de platine; j'ai donc cherché l'ordre des écrans interposés entre la couche liquide et la pile thermo-électrique. Dans ce cas, le verre jaune, cité plus haut, laisse encore passer une grande partie de la chaleur rayonnante; l'ordre des autres écrans est tout-à-fait différent de celui que l'on a trouvé pour les lames de platine. On doit donc en conclure que ce n'est pas la radiation calorifique qui produit ce phénomène, mais des rayons accompagnant les rayons lumineux les plus réfrangibles, comme

les écrans semblent l'indiquer, ainsi que les diverses parties du spectre. En effet :

» J'ai appliqué verticalement une des deux lames de platine, qui avait été préalablement chauffée au rouge, sur une des faces d'une boîte en verre qui avait été noircie, à l'exception d'une partie qui se trouvait vis-à-vis de la lame; puis ayant projeté successivement, sur cette lame, les rayons colorés du spectre solaire formés en réfractant les rayons directs du soleil, on n'a eu un courant électrique sensible que lorsque la lame était exposée dans les rayons violets ou bleus.

» Toutes les fois que les lames sont très propres, qu'elles ont séjourné dans l'acide nitrique concentré, puis qu'elles ont été rougies, les rayons du spectre sont absolument sans effet pour déterminer la production de courants électriques dont nous recherchons la cause. Cette expérience tend à montrer que les rayons qui agissent sur les lames de platine ou d'or, plongées dans des dissolutions, sont plus réfrangibles que les rayons calorifiques. On peut se demander maintenant quel est le mode d'action de ces rayons dans la circonstance actuelle; c'est une question à laquelle il est difficile de répondre. Cependant comme les effets sont presque nuls quand les surfaces des lames sont très nettes et parfaitement décapées, il pourrait se faire que les effets produits, quand elles ne sont pas dans cet état, fussent dus à l'action des rayons chimiques sur des corpuscules d'une ténuité extrême qui adhèrent aux surfaces. La nature des corpuscules étant inconnue, on est conduit naturellement à rechercher d'abord l'influence que peut exercer sur le phénomène la présence de corps inaltérables à la lumière, tels que le charbon et divers oxides métalliques placés sur les lames en couches très minces. Alors, dans ce cas, bien loin d'avoir une augmentation d'effets lorsqu'on expose les lames ainsi recouvertes à la radiation solaire, on a plutôt une diminution, résultat inverse de ce qui devait se passer si le phénomène était purement calorifique, les corps mis sur les lames de platine ayant un pouvoir absorbant plus fort sur le platine.

» J'ai opéré aussi avec des lames de métaux oxidables.

» *Lames de laiton.* — Des lames de laiton bien décapées ont été mises dans l'appareil à compartiment qui renfermait de l'eau ordinaire aiguisée de quelques gouttes d'acide nitrique; on a obtenu un courant de 4 à 5 degrés, lors de l'exposition aux rayons solaires; alors on a fait passer un courant électrique par les deux lames servant d'électrodes; la lame positive s'est oxidée, tandis que l'autre est restée brillante; alors

on les a exposées successivement à la lumière solaire, la lame brillante s'est comportée comme avant, c'est-à-dire qu'elle a pris au liquide l'électricité positive, tandis que la lame oxidée est devenue fortement négative: ayant interverti l'ordre des lames, quand elles servaient d'électrodes, les résultats ont encore été les mêmes; une des lames oxidées ayant été mise successivement dans les rayons colorés du spectre solaire, a donné :

Rayons du spectre.	Intensité du courant par première impulsion.
Rouges	1°
Orangés	»
Jaunes	2
Verts	4
Bleus	2
Indigo	»
Violets	0

» *Lames d'argent.* — Des lames d'argent parfaitement décapées ont été mises dans l'appareil à compartiment rempli d'eau acidulée par l'acide sulfurique; exposées successivement à la radiation solaire, elles ont donné un courant de 1 à 2 degrés; la lame exposée était négative par rapport au liquide : en opérant avec les mêmes lames qui avaient servi d'électrodes et exposant à la radiation solaire la lame positive ou oxidée, le courant n'a pas été plus intense.

» Cette faible action pouvant être négligée, j'ai déposé sur les lames d'argent des vapeurs de brome, d'iode et du chlore. Avec une couche épaisse de vapeur d'iode, répandu sur la lame, on a obtenu un courant assez intense, dirigé dans un sens tel, que la lame exposée au soleil prenait au liquide l'électricité négative, résultat qui annonçait l'action de l'iode sur l'argent; quand la couche d'iode était très mince, on avait un courant électrique allant en sens inverse, ce qui indiquait une action chimique inverse de la précédente; par première impulsion à la lumière diffuse, le courant obtenu, dans une expérience, produisait une déviation de 45 degrés.

» Quand on emploie du brome au lieu d'iode, le courant qui est assez fort a toujours lieu de manière que la lame exposée est négative par rapport au liquide.

» Ces courants n'ont que peu de durée, car une exposition de quelques instants à la radiation atmosphérique suffit pour effectuer complétement la réaction du brome et de l'iode sur l'argent.

» Avec le chlore, le courant a été si peu marqué, que l'effet n'est pas différent de celui que l'on obtient avec les lames de platine seules.

§ II. *Courants électriques développés par la décomposition du chlorure, bromure et iodure d'argent, sous l'influence de la lumière solaire.*

» Lorsque le chlorure d'argent est exposé à la lumière, il perd de son chlore et se change en sous-chlorure; d'un autre côté, ce composé n'étant pas conducteur de l'électricité, lorsqu'il est en masse, et le devenant quand il est en couche très mince, il s'ensuit que l'on peut observer les effets électriques produits sur ce corps par la radiation solaire. Pour cela on l'étend, quand il est nouvellement préparé, sur une lame de platine plongée dans l'eau rendue conductrice par l'addition de quelques gouttes d'un acide, d'acide nitrique, par exemple; dès l'instant que la lame est exposée aux rayons solaires, ou même à la lumière diffuse, le chlorure noircit et l'aiguille du galvanomètre se dévie de plusieurs degrés dans un sens qui annonce que la lame est positive; résultat facile à expliquer : le chlorure, en se décomposant, prend l'électricité positive qu'il transmet à la lame métallique avec laquelle il est en contact, tandis que le liquide prend l'électricité négative. On ne peut opérer ici avec une lame d'argent, attendu que la réaction du chlore, qui provient de la décomposition du chlorure sur l'argent, produit un courant en sens inverse de celui qu'on étudie. Une lame d'or se comporte de la même manière qu'une lame de platine.

» Le meilleur procédé pour étendre le chlorure d'argent sur la lame, est de le déposer dessus quand il est encore humide et de faire chauffer doucement la lame dans l'obscurité; l'adhérence du chlorure est telle, qu'il ne tombe pas, quelle que soit la position que l'on donne à la lame dans le liquide.

» Le bromure d'argent, qui se décompose à la lumière plus vite que le chlorure, donne aussi un courant plus intense. Pour comparer les effets produits par la radiation sur le chlorure et le bromure, on a recouvert deux lames de platine, chacune de 4 centimètres carrés de surface, l'une de chlorure, l'autre de bromure d'argent; ces lames ayant été mises dans l'appareil à compartiment, on a eu à la lumière diffuse, 15 degrés de déviation avec le chlorure, et 26 degrés avec le bromure. Le bromure d'argent, dans les premiers instants, a chassé l'aiguille à 55 degrés, à l'instant où l'on a fait tomber dessus un rayon solaire; dans une autre expérience, le

bromure d'argent, à la lumière diffuse, a donné, par première impulsion, une déviation de 75 degrés.

» Mais une différence qui caractérise ces deux corps, c'est que le chlorure donne pendant très long-temps un courant d'une égale intensité, et même au bout de deux heures d'exposition à la lumière solaire on a encore un courant sensible. Il n'en est pas de même avec le bromure; après une exposition de dix minutes à la lumière diffuse, il a perdu presque toute sa faculté de donner un courant.

» L'iodure d'argent, qui ne change pas sensiblement de couleur à la lumière, donne néanmoins, dans les mêmes circonstances, un courant presque aussi intense que celui du chlorure; cependant il n'est pas constant pendant aussi long-temps. Ce courant, produit par l'iodure d'argent, annonce qu'il se change en sous-iodure, à l'action de la lumière. Il est très probable que dans l'explication des phénomènes relatifs à la production des dessins photogéniques faits par M. Daguerre, il faut avoir égard à cette transformation. Du reste nous y reviendrons plus tard. Cette propriété du chlorure d'argent de donner un courant assez constant pendant un certain temps, permet de s'en servir pour déterminer les rapports des nombres de rayons chimiques qui traversent les écrans, ainsi que la distribution des rayons qui influent sur le chlorure d'argent dans le spectre solaire. Voici les résultats de deux expériences :

Écrans.	Nombre des rayons.
Sans écrans	100
Verre blanc	66
Verre violet	53
— bleu	40
— vert, — jaune, — rouge	0

Rayons du spectre.	Intensité du courant.
Rouges, Orangés, Jaunes	0
Verts	trace
Bleus	$0^{o},75$
Indigo	1°
Violets	3°
Rayons au-delà du violet	3°

» En résumé ce Mémoire met en évidence les faits suivants :

» 1°. Des rayons qui accompagnent les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire, font éprouver à des lames métalliques plongées dans un liquide, une action telle, qu'il en résulte des effets électriques auxquels on ne peut attribuer une origine calorifique.

» 2°. La décomposition du chlorure, du bromure et de l'iodure d'argent sous l'influence de la lumière, produit des effets électriques qui peuvent servir à déterminer le nombre des rayons chimiques actifs.

» On voit donc que lorsqu'on veut employer les effets électriques produits dans la réaction de deux dissolutions l'une sur l'autre, pour étudier cette réaction sous l'influence de la lumière, il faut avoir égard à l'action de la radiation solaire sur les lames métalliques employées, dont l'effet peut être séparé facilement de l'effet total, en opérant avec l'appareil rempli successivement des deux liquides. Du reste, dans un autre Mémoire, je reviendrai sur la distinction de ces deux effets. »

M. **Nestor Urbain** commence la lecture d'un Mémoire ayant pour titre : *Histoire et discussion des Tables de mortalité.*

MÉMOIRES PRÉSENTÉS.

PHYSIQUE MATHÉMATIQUE. — *De l'action de l'archet sur les cordes ; par* M. **Duhamel.**

(Commissaires, MM. Cauchy, Savart, Coriolis.)

L'auteur donne, dans la Lettre suivante qui accompagnait l'envoi de son Mémoire, une idée des questions qu'il y a traitées.

« J'ai déjà présenté, il y a quelques années, une Note concernant l'action de l'archet sur les cordes, mais sans donner la démonstration des formules qu'elle renfermait. Dans le Mémoire que je présente aujourd'hui, je donne d'abord ces démonstrations, ainsi que celles de plusieurs propositions nouvelles sur les cordes vibrantes ; j'y ai joint diverses expériences par lesquelles j'ai vérifié mes idées théoriques.

» Les physiciens se sont encore peu occupés de cette question ; les traités élémentaires n'en parlent pas, et je ne connais que Daniel Bernoulli qui en ait dit quelques mots dans son important Mémoire sur les sons produits par les tuyaux d'orgue. Il assimile l'archet à une roue dentée; les brins de colophane font, dit-il, la fonction des dents : et l'habileté du joueur de violon consiste à faire en sorte que le nombre des coups de dents soit égal au nombre de vibrations que la corde peut faire quand elle se meut dans toute sa longueur, ou qu'elle se partage en un nombre quelconque de parties égales.

» Cette explication ne me semble pas admissible; car il n'y aurait qu'une seule vitesse de l'archet qui serait propre à produire avec netteté l'un quelconque des sons que la corde peut rendre : tandis que l'expérience

COMPTE RENDU

DES SÉANCES

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU LUNDI 11 NOVEMBRE 1839.

PRÉSIDENCE DE M. CHEVREUL.

MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS

DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE.

PHYSIQUE. — *Note de* M. **Biot** *sur le* Compte rendu *de la dernière séance.*

« Le Mémoire d'ailleurs très intéressant, qui nous a été présenté au nom de M. Edmond Becquerel dans la dernière séance, et qui a été inséré au *Compte rendu*, m'a paru renfermer une légère inexactitude que je crois utile de signaler, pour conserver aux résultats obtenus la fidélité d'interprétation nécessaire à leur utilité future.

» En faisant agir une source constante de radiation sur un même système chimique, d'abord à travers l'air seul, puis à travers divers écrans interposés, l'auteur du Mémoire suppose que les effets successivement opérés sur le galvanomètre, sont proportionnels aux nombres des rayons efficaces incidents et transmis. Mais, j'ai déjà fait remarquer dans les *Comptes rendus*, que cette proportionnalité numérique ne peut pas être admise, à cause de l'inégalité d'action des diverses parties du flux total sur le système chimique, au lieu qu'elle existait dans les expériences de M. Melloni. Car, en définissant les quantités égales de chaleur, par la condition de fondre

une même masse de glace, ou de dilater également une même masse de gaz sec, cet excellent physicien avait constaté que les rayons calorifiques de toute nature agissaient avec une énergie égale sur la pile enduite de noir de fumée; et les commissaires de l'Académie qui ont examiné son travail, ont eu soin d'insister sur la vérification de ce point capital qui était la base de toutes ses déterminations numériques.

» En publiant son précédent Mémoire dans la *Bibliothèque de Genève*, M. Edmond Becquerel n'a pas dissimulé cette objection que je lui avais faite, que son appareil pouvait indiquer des différences d'effets; et non pas mesurer immédiatement les rapports des nombres de rayons efficaces incidents et transmis à travers des écrans divers. Mais il a cru, comme son père, que je la fondais sur l'inconstance de la réaction chimique pendant la durée de l'expérience, ce qui n'en est nullement le sens. Dans cette supposition, il a rapporté de nouvelles expériences où, en variant l'étendue de la surface d'incidence d'un même écran, toutes les autres circonstances restant les mêmes, il trouve que l'effet produit a varié proportionnellement à ces surfaces. Or, s'il veut examiner les motifs de mon opinion, tels que je les ai exposés dans le *Compte rendu* du 5 août dernier, il pourra voir que cette dernière expérience ne les infirme en aucune manière, puisqu'elle n'y a pas le moindre rapport. Je croirais inutile de les répéter ici; mais, puisqu'ils ne paraissent pas avoir produit sur son esprit l'effet que j'en espérais, je me bornerai à les traduire par un exemple mathématique qui, je crois, achèvera de les mettre dans une entière évidence.

» On sait aujourd'hui que les diverses parties d'une même radiation agissent inégalement, et quelquefois en sens contraire, sur un système chimique donné. Concevons idéalement une radiation composée de trois groupes A, B, C, de rayons ayant ainsi des énergies d'actions différentes. En les faisant d'abord agir simultanément à travers le vide sur un système chimique, il se produira un certain effet résultant de leurs actions réunies. Maintenant, interposez successivement dans leur trajet trois écrans divers, dont le premier absorbe seulement le groupe A, le second, le groupe B, le troisième, le groupe C. Vous aurez ainsi successivement quatre effets produits, lesquels seront dus aux groupes $A+B+C$, $B+C$, $A+C$, $A+B$. Comment ces effets seraient-ils proportionnels aux nombres successifs de rayons transmis agissant. Dans chaque cas, si ces rayons exercent des actions propres d'intensités inégales, qui peuvent différer jusqu'à être de sens contraire, ainsi que l'expérience l'a prouvé?

» Je n'ajouterai plus qu'une remarque. Dans son dernier Mémoire, M. Edmond Becquerel a étudié comparativement les facultés que divers écrans possèdent pour transmettre une même radiation efficace, à un même système chimique, et il a trouvé que ces facultés suivent un tout autre ordre que celui que M. Melloni avait reconnu aux mêmes genres d'écrans pour la transmission de la chaleur rayonnante. De là il a conclu, avec raison, que ce n'est pas la radiation calorifique qui produit ces nouveaux phénomènes. Il ne s'est vraisemblablement pas rappelé que cette dernière conséquence a déjà été établie par des expériences du même genre, et par le même genre d'argument, dans les *Comptes rendus* des 25 février et 4 mars derniers. C'était en effet, un des premiers caractères qu'il fallait chercher à reconnaître, quand on se proposait de fixer les caractères généraux des radiations qui excitent les phénomènes chimiques, comme on se l'était proposé alors. »

ZOOLOGIE. — *Mémoire sur la classification et la structure des Ophiosomes ou Céciloïdes, famille de reptiles qui participent des Ophidiens et des Batraciens, relativement à la forme et à l'organisation; par* M. DUMÉRIL.

« Linné, dans la dissertation de l'un de ses élèves, P. Sundius, fit le premier connaître, en 1748, le genre CÉCILIE. Il décrivit sous ce nom une espèce de serpent, dont il n'avait trouvé l'existence indiquée dans aucun auteur (1). Cette description, très curieuse en effet, était si nouvelle, si parfaite, que tous les naturalistes avaient, depuis cette époque, inscrit ce genre dans l'ordre des serpents.

» Cependant en 1789, Schneider, le célèbre helléniste et naturaliste de Francfort, ayant eu occasion de disséquer un exemplaire de Cécilie, à demi desséché, avait observé sur cet animal plusieurs faits curieux d'anatomie, surtout dans ses parties osseuses, et comme il avait reconnu de véritables écailles sur quelques lambeaux de sa peau, cette particularité le porta à rapprocher ce genre de celui des anguilles, tout en le laissant cependant parmi les amphibies ; aussi intitula-t-il sa dissertation (2) CÉCILIE, « genre qui parmi les serpents est le plus rapproché des poissons, et qui est surtout très voisin des murènes. »

---

(1) *Et hunc nostrum serpentem à nemine adhùc descriptum, imò nec nominatum quidem.* LINNÉ. *Amœnitates academicæ.*

(2) *Historiæ amphibiorum naturalis et litterariæ. Fasc.* 2, 1801, page 359.

nous avons dernièrement communiquée à l'Académie, et dans laquelle une machine du Great-Western Railway a atteint une vitesse de 55.4 milles par heure, en tirant le convoi seulement chargé de quelques personnes.

» Dans le calcul, nous avons tenu compte de la résistance de l'air et du frottement des waggons, d'après les expériences que nous avons communiquées à l'Académie dans une Note récente, et nous avons aussi, d'après les expériences spéciales, eu égard à l'augmentation de vaporisation des machines, résultant de leur accroissement de vitesse.

» Pour employer les machines les plus puissantes du tableau ci-dessous, il suffirait d'une largeur de voie de $6\frac{1}{2}$ pieds anglais, ou de 2 mètres français. Pour transformer les vitesses suivantes en mesures françaises, il suffit de savoir que 5 milles anglais font 2 lieues de poste.

Tableau de la vitesse et de la consommation de combustible des locomotives, à voie étroite et à large voie.

DÉSIGNATION de la voie.	DÉSIGNATION de la machine.	VAPORISATION, en pieds cubes d'eau par heure.	DIAMÈTRE du cylindre.	COURSE du piston.	DIAMÈTRE de la roue.	POIDS de la machine.	VITESSE avec une charge de 50 tonnes brutes, convoi non compris.	COKE par tonne brute par mille, avec la charge de 50 tonnes brutes.	VITESSE maximum, ou sans autre charge que le convoi d'approvisionnement.
		pieds cubes	pouces.	pouces.	pieds.	tonnes.	milles par heure.	livre.	milles par heure.
Étroite	De Liverpool.....	60	11	16	5	8	23.23	0.51	31.38
Id.	De Birmingham...	100	12	16	5	11	29.80	0.54	39.00
Large	Du Great-Western.	120	14	16	8	18	32.43	0.65	41.29
Id.	*Id.*	200	16	16	7	18	38.45	0.92	48.00
Id.	*Id.*	200	14	16	8	18	41.60	0.85	53.00
Id.	*Id.*	300	14	16	8	20	51.40	1.03	65.00

PHYSIQUE. — *Sur les effets électriques qui se produisent sous l'influence solaire.* — Lettre de M. Ed. Becquerel.

« Le lundi 11 de ce mois, M. Biot a présenté à l'Académie quelques observations sur le Mémoire dont mon père a lu un extrait en mon nom, dans la séance du 4 novembre dernier. Ces observations m'ayant prouvé que je n'avais pas exposé les faits qui y sont relatés avec assez de clarté pour être bien compris, j'ai l'honneur de vous prier de vouloir bien com-

muniquer à l'Académie les développements suivants, qui sont nécessaires, je crois, pour qu'on puisse apprécier le but de mes recherches :

» M. Biot pense que les rapports des nombres trouvés par l'intensité du courant électrique produit lors de la transformation du chlorure d'argent en sous-chlorure, ou pendant la décomposition du bromure, sous l'influence de la lumière solaire, ne peuvent servir à mesurer les rapports des rayons actifs qui tombent sur ce composé. En effet, il suppose qu'il existe dans un rayon solaire plusieurs sortes de rayons agissant en différents sens sur la substance impressionnable; je croyais cependant que l'on n'en avait encore reconnu que deux sortes agissant sur le chlorure d'argent : 1° des rayons qui accompagnent les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire, et qui font passer le chlorure à l'état de sous-chlorure; 2° des rayons accompagnant les moins réfrangibles (peut-être sont-ce les rayons calorifiques) qui, par une action prolongée, transforment le chlorure en un autre produit. Or, dans les expériences dont j'ai eu l'honneur de communiquer les résultats à l'Académie, le courant électrique est produit, lors de l'exposition du chlorure, dans les rayons les plus réfrangibles du spectre et même au-delà, tandis que, dans les rayons les moins réfrangibles, c'est-à-dire dans les rayons rouges, je n'ai jamais obtenu de courant : ce qui prouve que la transformation qu'éprouve alors le chlorure ne donne lieu à aucune trace d'effets électriques, soit parce que l'action n'est pas instantanée, soit par toute autre cause. Il suit de là qu'il n'y a de courant produit que pendant la transformation du chlorure en sous-chlorure. Les seuls rayons actifs accusés par l'appareil dont j'ai fait usage, sont donc ceux qui opèrent cette transformation et qui accompagnent, par conséquent, les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire. Ce sont les rapports des nombres de ces rayons que je crois avoir déterminés dans mes expériences. Il peut se faire cependant que je me trompe; mais je pense qu'il est inutile d'insister davantage sur ce sujet : car les nombres trouvés expriment toujours la résultante des effets chimiques produits, et c'est de cette détermination seule dont on a besoin dans les expériences.

» M. Biot a encore fait observer que l'on savait que l'ordre des écrans perméables aux rayons chimiques de la lumière solaire, qui réagissent sur le chlorure d'argent, était différent de l'ordre des écrans qui transmettent les rayons calorifiques. Je prendrai la liberté de lui faire remarquer que je connaissais parfaitement les recherches qui ont été faites à ce sujet avant les miennes. Mon but a été uniquement de reconnaître quelle était la nature de la radiation qui agissait sur des lames de platine ou d'or,

plongeant dans des liquides, là où l'on pouvait supposer l'influence des rayons calorifiques et nullement celle des rayons chimiques. L'expérience m'a prouvé que, dans ce cas, l'ordre des écrans est différent de celui qui est relatif aux rayons calorifiques, et a des rapports avec l'ordre de ces mêmes écrans, relativement aux rayons chimiques, quand ils agissent sur le chlorure d'argent.

» Quant à mes expériences sur ce composé, je n'ai employé les écrans que dans le but de trouver, au moyen des effets électriques, des nombres qui fussent en rapport avec les résultantes des actions chimiques produites, les moyens ayant manqué jusqu'ici pour faire cette appréciation.

» D'après les explications que je viens d'avoir l'honneur de présenter à l'Académie, je pense que je serai parfaitement d'accord avec M. Biot, dont les conseils sont pour moi d'un grand prix. »

Après avoir entendu cette lettre, M. **Biot** dit « qu'il regrette de ne pas pouvoir partager les idées théoriques qu'elle renferme. L'intérêt même qu'il porte aux ingénieuses recherches de M. Edmond Becquerel, le détermine à présenter dans la séance prochaine les motifs de son dissentiment. »

MÉTÉOROLOGIE.— M. **Fournet** adresse à l'Académie un Mémoire *sur l'interversion de la température atmosphérique durant les hivers rigoureux.*

M. Fournet discute dans ce Mémoire, sur lequel nous aurons l'occasion de revenir, des observations qui montrent avec évidence que durant les hivers rigoureux, il fait quelquefois notablement plus froid dans les plaines que sur les montagnes et les plateaux élevés. M. Fournet trouve, de plus, une cause naturelle de ces anomalies dans la manière dont les vents du nord glissent alors *sous* les vents méridionaux.

M. **Arago** fait hommage à l'Académie, au nom de l'auteur, M. **Broussaud**, d'un exemplaire de l'ouvrage que cet ingénieur vient de publier sur la *Mesure d'un arc de parallèle moyen limité par les tours de Fiume et de Cordouan.* (Voir au *Bulletin bibliographique.*)

En raison de l'importance de cet ouvrage, M. Arago est prié de chercher les moyens d'en faire connaître le contenu sans déroger aux usages de l'Académie, relativement aux communications imprimées.

M. **Blein** adresse des remarques sur les expressions employées dans

d'entretenir l'Académie ne sont pas les mêmes que ceux décrits par ces savants, et il se réserve de répondre d'une manière plus précise à la réclamation de M. Bory, lorsque celui-ci aura cité les passages contenant l'énoncé du phénomène physiologique signalé par M. Nordmann. »

« M. **Bory de Saint-Vincent** réplique que *clytie* et *campanulaire* étant la même chose, son observation sur le fait donné pour une découverte doit subsister. »

PHYSIQUE. — *Remarques sur quelques points de la théorie des radiations, en réponse à une Lettre de* M. E. Becquerel, *lue à la dernière séance, et insérée au* Compte rendu; *par* M. **Biot**.

« L'Académie s'apercevra aisément que ce qui va suivre a un but purement scientifique: ce n'est ni une polémique, ni une controverse. Il ne peut y avoir rien de tel, de ma part, envers un jeune homme dont j'apprécie le zèle et l'esprit inventif, autant que j'aime sa personne. Ce sont des explications théoriques qui se rattachent seulement en partie à ses dernières recherches; je tâcherai qu'elles ne soient pas dépourvues de nouveauté et d'intérêt.

» Le pouvoir chimique des radiations, tant célestes que terrestres, se manifeste par des phénomènes de combinaison et de décomposition qui s'opèrent sous son influence, tandis qu'ils sont très faibles ou insensibles quand on ne le fait pas agir. M. Edmond Becquerel a imaginé de mesurer cette action par l'intensité des courants électriques que l'effet chimique opéré développe. Il peut alors y appliquer le galvanomètre, et profiter de toute la délicatesse de cet instrument. L'idée est certainement ingénieuse; et je ne doute pas que l'emploi du galvanomètre dans ces phénomènes n'y devienne très utile, surtout comme moyen d'investigation. Néanmoins, on verra tout-à-l'heure que le résultat total, ainsi obtenu, n'exprime pas toujours l'action propre des radiations, comme M. Becquerel paraît le supposer. Mais, pour le moment, j'admettrai d'abord avec lui, que la force magnétique totale qu'on observe, soit en effet proportionnelle à cette action.

» Les éléments de la radiation générale qui produisent ces effets, sont inégalement absorbables par des écrans diaphanes de diverse nature. Ils ont cela de commun avec les éléments de la même radiation qui excitent les phénomènes thermoscopiques, et avec ceux qui, reçus par la rétine humaine, développent la sensation de la vision. Mais ils se montrent différents de ceux-ci, comme ceux-ci se montrent différents entre eux, parce

que les proportions de leur absorption dans les mêmes substances sont très dissemblables. C'est ainsi qu'on parvient à les distinguer.

» En faisant agir la radiation solaire ou atmosphérique, sur un même composé chimique, d'abord sans écran, puis à travers des écrans divers, M. Edmond Becquerel avait supposé que les forces développées dans le galvanomètre, sous ces diverses circonstances, étaient proportionnelles aux nombres relatifs des rayons efficaces qui les produisaient. De sorte qu'en représentant ce nombre par 100 dans l'action directe, le rapport des forces transmises, à la force directe, donnait le nombre proportionnel de rayons efficaces transmis. Je lui ai fait remarquer que cette proportionnalité ne pouvait pas exister dans ses expériences, parce que les diverses portions du flux incident actif, qui avaient des réfrangibilités diverses, et qui étaient successivement absorbées par les écrans, agissaient sur le composé chimique avec des intensités inégales; ce qui n'avait pas lieu dans les expériences de M. Melloni, qu'il avait prises pour modèle de ses calculs. Car, dans celles-ci, la pile enduite de noir de fumée, qui reçoit le flux calorifique, est également impressionnée par toutes les espèces de rayons dont ce flux se compose, même lorsqu'ils viennent des sources les plus dissemblables; et alors les effets thermoscopiques observés sont proportionnels aux nombres relatifs des rayons incidents et transmis, du moins quand on néglige les pertes occasionées par les réflexions, ou qu'on en tient compte. Pour rendre le raisonnement plus sensible, j'avais décomposé idéalement la radiation active en trois groupes de rayons, d'efficacité inégale, et j'en avais tiré la preuve qu'alors la proportionnalité supposée n'avait plus lieu. M. Edmond Becquerel a cru que j'entendais par là qu'il y avait en effet trois espèces de rayons réels, agissant inégalement sur le chlorure d'argent qui était le sujet de ses expériences, tandis qu'il n'en reconnaît que deux espèces, correspondant aux deux réfrangibilités extrêmes du spectre; et comme il avait seulement comparé des effets opérés par l'espèce la plus réfrangible, il croit mon raisonnement non applicable à un tel cas. Mais il s'y applique au contraire exactement, puisque ces rayons, pris vers l'extrémité violette du spectre, n'étaient certainement pas d'une réfrangibilité unique, ni d'une énergie égale entre eux. De sorte que leur hétérogénéité suffit pour que mon raisonnement s'y applique, et qu'on puisse les décomposer idéalement en plusieurs groupes d'intensité inégale, comme je l'ai fait.

» Quant à l'hétérogénéité de ces rayons actifs, elle est aussi évidente que celle des rayons lumineux violets qui les accompagnent entre les mêmes li-

mites de réfrangibilité. Le chlorure d'argent est impressionné inégalement par chacun d'eux, selon qu'ils sont plus ou moins réfrangibles, de même que notre rétine est affectée inégalement par les rayons lumineux compris dans l'amplitude totale de réfrangibilité du spectre visible pour nous. Chaque composé chimique est ainsi plus ou moins impressionnable, entre certaines limites de réfrangibilité qui lui conviennent. Pour la couche mince d'iode de M. Daguerre, le centre du spectre actif correspond à la réfrangibilité des rayons de lumière qui nous donnent la sensation du bleu moyen. Pour les lames de platine, dépouillées de toute substance étrangère par le feu, et plongées dans un même liquide, l'action observable s'exerce dans l'amplitude de réfrangibilité des rayons bleus et violets visibles, suivant une curieuse expérience faite par M. Edmond Becquerel lui-même. Pour la substance changeante du gaïac, l'amplitude de réfrangibilité du spectre visible comprend des rayons efficaces d'influences contraires. Enfin, pour la pile thermoscopique enduite de noir de fumée, le spectre actif commence au-delà de la limite la moins réfrangible du spectre lumineux, et s'étend peut-être en se raréfiant, jusqu'au-delà de sa limite la plus réfrangible. Mais tous les rayons calorifiques compris dans cette amplitude, dont on ne connaît pas les bornes, impressionnent la pile avec une égale énergie quand ils sont absorbés par elle; ce qui permet d'évaluer comparativement leurs nombres relatifs, par leurs effets thermoscopiques, comme l'a fait M. Melloni. L'ensemble de toutes ces indications nous conduit, comme je l'ai dit ailleurs, à considérer généralement les radiations émanées des corps, comme composées, non de deux, ou de trois, mais d'une infinité de rayons, ayant des qualités et des vitesses diverses, susceptibles d'être émis, absorbés, réfléchis, réfractés; et qui, selon leurs qualités propres, parmi lesquelles il faut comprendre leur nature et leurs vitesses actuelles, peuvent produire la vision, la chaleur, déterminer ou favoriser certains phénomènes chimiques, et probablement exercer beaucoup d'autres actions encore inconnues, lorsqu'ils sont reçus par des corps ou par des organes sensibles à leurs impressions. Mais le cas où leur énergie d'action serait égale, même dans d'étroites limites de réfrangibilité, doit être infiniment rare; et peut-être ne se réalise-t-il que dans les effets thermoscopiques, opérés par une totale absorption.

» Les effets magnétiques qu'on observe, quand une radiation complexe agit sur un composé chimique, peuvent-ils du moins toujours servir à mesurer comparativement l'action propre et actuelle que cette radiation exerce? Je fus d'abord porté à le croire lorsque M. Edmond Becquerel

proposa ce procédé d'observation; mais des réflexions ultérieures m'inspirèrent des doutes, qu'une expérience récente de M. Victor Regnault m'a paru devoir changer en certitude. Elle se trouve décrite dans un Mémoire très remarquable sur la théorie des éthers, que ce jeune et habile observateur a publié dans le dernier numéro des *Annales de Chimie*. En faisant agir le chlore sur l'éther hydro-chlorique de l'alcool à l'état de gaz, sous l'influence de la radiation solaire, il a trouvé que : « Cette influence est » seulement nécessaire au commencement de l'expérience, mais qu'une » fois la réaction établie, elle se continue d'elle-même à l'ombre, et ne » s'arrête même pas quand le jour vient à tomber. » Si l'on mesurait l'intensité du courant électrique développé dans un tel cas, elle n'exprimerait évidemment point l'intensité isolée du pouvoir exercé par la radiation, mais l'effet total produit simultanément par ce pouvoir, et par la réaction chimique se continuant d'elle-même. Or une complication semblable, ou analogue, peut s'opérer ainsi dans beaucoup d'autres circonstances, à des degrés divers; et il devient nécessaire de la résoudre expérimentalement dans chaque cas, ou de s'assurer qu'elle est insensible, pour apprécier l'influence isolée de la radiation, d'après l'effet magnétique total observé. Cela est d'autant plus essentiel que la plupart des substances très impressionnables, manifestent déjà quelque commencement de réaction dans l'obscurité la plus profonde. Et qui sait si cette réaction propre, indépendante de la radiation, ne devient pas aussi plus active une fois que la radiation l'a excitée?

» Dans le remarquable Mémoire que je viens de rappeler, M. Regnault a toujours exposé les éléments de ses produits aux actions successives de la radiation diffuse et de la radiation solaire; et il n'a employé celle-ci que lorsque la première lui a paru impuissante. C'est déjà une judicieuse épreuve. Mais il resterait à discerner quelles portions de la radiation solaire totale produisent les nombreux effets qu'il a observés. Car cette radiation est très complexe, et il importe de savoir si tous ses éléments, ou quelques-uns seuls, sont essentiels au résultat obtenu dans chaque cas. En outre, la radiation, pour agir, devant traverser une certaine épaisseur de verre, qui forme les parois des ballons où les gaz sont renfermés, il se pourrait que la différence d'effets des deux radiations solaire et atmosphérique provînt seulement d'une différence d'intensité, non de nature des rayons actifs; ce qu'on pourrait découvrir, en variant les matières dont les vases sont faits, ou en essayant de la modifier par des écrans de diverse nature.

» Que l'on me permette d'appliquer les mêmes principes à l'accomplissement de plusieurs fonctions vitales des végétaux, que l'on suppose habituellement excitées, ou même déterminées, par l'action de la lumière. Qu'une telle action soit en effet exercée par les mêmes éléments de radiation qui produisent la sensation de la vision dans nos yeux, c'est, je crois, ce dont on n'a aucune preuve. Mais n'est-il pas, au contraire, plus probable aujourd'hui, que les phénomènes dont il s'agit sont opérés par les éléments invisibles qui accompagnent ceux-là, et que nous trouvons aptes à déterminer des phénomènes chimiques analogues dans les substances inertes? Cela pourrait se décider en soumettant des végétaux très impressionnables, des sensitives, par exemple, à l'influence de la radiation atmosphérique ou solaire, modifiée par l'interposition d'écrans diaphanes de différente nature, parmi lesquels on choisirait successivement les plus propres à intercepter les radiations de telle ou telle réfrangibilité. Ou bien encore, en essayant l'effet de ces écrans sur le dégagement des gaz par des plantes plongées dans l'eau, sous des cloches de verre. Je m'étais préparé à faire une suite d'essais de ce genre pendant l'été dernier. Mais en ayant été détourné par d'autres occupations, et ne sachant pas si je pourrai les reprendre, je consignerai du moins ici une expérience que je fis, il y a bien des années, pour ce but, et dont le résultat, facile à interpréter aujourd'hui, me semble tout-à-fait conforme aux idées que je viens d'exposer.

» Me trouvant avec M. Arago à Formentera, pour le prolongement de la méridienne en 1808, je fis accidentellement quelques expériences eudiométriques sur la nature du gaz dégagé par les feuilles de l'*Agave americana*, quand elles sont exposées sous l'eau à l'influence de la lumière solaire. Me rappelant les modifications que M. Decandolle avait opérées dans les époques de sommeil des plantes, par l'influence de la lumière artificielle, je voulus en essayer l'effet sur le dégagement des feuilles de l'Agave. Pour cela, en ayant mis quelques-unes sous l'eau dans une cloche renversée, je les exposai pendant plusieurs heures à la lumière de deux lampes d'Argant, réfléchie sur elles par les grands miroirs métalliques qui servaient pour nos signaux de nuit. Tout accès à la lumière naturelle était d'ailleurs interdit. Il ne se dégagea pas la moindre bulle de gaz. Ceci constaté, j'emportai la cloche hors de la cabane, et elle se trouva exposée à la lumière diffuse d'un ciel sans soleil, couvert de nuages blancs. Le gaz s'échappa à l'instant avec une abondance extraordinaire. Cependant, la lumière projetée par les réflecteurs avait été si vive, que l'œil n'en aurait pu supporter l'éclat,

tandis qu'il recevait sans inconvénient celle du ciel nuageux. Je gardai le souvenir de ce résultat sans m'en rendre compte. Lorsque vinrent plus tard les découvertes de M. Melloni, je pensai qu'on pourrait l'attribuer à quelques rayons calorifiques de la lumière solaire, qui seraient particulièrement transmissibles à travers les membranes végétales. Mais quelques essais tentés par cet habile physicien pour éclaircir ce soupçon, ne le confirmèrent point; et la différence si frappante des effets observés, me demeura encore inexplicable. Je la compris enfin lorsque M. Daguerre nous eut donné ses papiers sensibles, avec lesquels on put constater l'existence de rayons invisibles qui excitent les phénomènes chimiques, et qui sont infiniment plus abondants, ou plus puissants, dans la lumière atmosphérique diffuse que dans la lumière artificielle la plus intense, surtout après qu'on l'a transmise à travers deux enveloppes de verre. Car, alors, de tels rayons manquant, ou étant très rares, dans la radiation qui accompagnait la lumière jetée par les miroirs sur les feuilles, quelque vive que cette lumière parût pour l'œil, il ne devait point se dégager de gaz.

» Voici encore un fait d'organisation qui me paraît devoir très probablement dépendre des mêmes principes.

» Nous avons vu, feu Delaroche et moi, près des îles Baléares, des pêcheurs descendre leurs lignes garnies d'hameçons, jusqu'à des profondeurs de 300 et 400 brasses, c'est-à-dire 1500 et 2000 pieds. Sur les côtes de Nice, on pêche ainsi, pendant l'été, jusqu'à 600 brasses ou 3000 pieds (1). Or, d'après les expériences de Bouguer, sur la transparence de l'eau de mer, mesurée à travers des épaisseurs connues, la lumière du soleil même serait depuis long-temps éteinte et devenue absolument insensible pour l'œil de l'homme à de pareilles profondeurs (2). Cependant on en retire des poissons pourvus de grands yeux; des poissons agiles, voraces, se nourrissant d'autres espèces qu'ils ne peuvent atteindre que par une chasse rapide, effectuée dans ces profondeurs mêmes. Car le gaz comprimé contenu dans la vessie natatoire de la plupart d'entre eux, ne peut s'échapper et se reprendre, encore moins se sécréter et se reformer, en assez peu de temps pour leur

---

(1) Ceci est attesté dans une note manuscrite adressée à M. Duméril, par M. Rlizzo.

(2) Bouguer trouvait, par ses expériences, que la lumière du soleil serait tout-à-fait insensible pour l'œil de l'homme à travers une profondeur d'eau de mer égale à 679 pieds ou 136 brasses. Représentons par $\frac{1}{n}$ cette intensité réduite, quand la profondeur est de 140 brasses : n devra certainement être un très grand nombre. D'après cela, en

permettre un mouvement rapide de quelque étendue dans le sens vertical. D'ailleurs, la très grande proportion d'oxigène que ce gaz renferme toujours, prouve encore qu'ils vivent habituellement à ces profondeurs. Or, il n'y a pas, je crois, d'exemple d'un animal ayant un organe très développé qui ne lui serve point. Ils voient donc, et ils voient dans des circonstances où la vision paraît devoir être impossible pour l'homme. Mais cette inégale aptitude n'a rien que de très concevable, quand il est reconnu que ce que nous appelons *lumière*, n'est qu'un élément particulier de la radiation totale émanée des corps que nous *voyons* lumineux. D'après les observations que M. Arago a faites sur les rayons venant des étoiles situées dans l'écliptique, et vers lesquelles la Terre marche, ou dont elle s'éloigne, une altération de $\frac{1}{10000}$, en plus ou en moins, dans leur vitesse propre, suffit pour leur ôter la faculté de produire la vision dans nos yeux; et la même altération de vitesse transporte cette faculté à d'autres rayons qui ne la possédaient pas auparavant. Puisque de tels rayons, invisibles pour nous, existent dans la radiation solaire, il est très possible que quelques-uns d'entre eux éprouvent, dans l'eau de la mer, une absorption beaucoup moindre que les rayons lumineux de notre spectre visible, auxquels les expériences de Bouguer s'appliquent exclusivement; et si les poissons qui vivent à de grandes profondeurs ont une rétine sensible à ces rayons-là, il est tout simple qu'ils aient la sensation de la vision claire et distincte, à des profondeurs où nous ne pourrions l'avoir.

» Les phénomènes déjà si divers que je viens de rappeler, ne sont vraisemblablement qu'une très petite partie de ceux que les radiations excitent ou déterminent. Ce nouveau champ de recherches est immense, et

---

calculant le progrès de l'extinction à des profondeurs progressivement plus grandes, on aura le tableau suivant :

Profondeur en brasses.	Intensité.
0	1
140	$\frac{1}{n}$
280	$\frac{1}{n^2}$
420	$\frac{1}{n^3}$

Ainsi, quelque réduction que l'on crût raisonnablement devoir faire aux nombres de Bouguer, on aurait toujours, pour l'œil de l'homme, une obscurité complète à la profondeur de 420 brasses.

promet des découvertes nombreuses aux expérimentateurs qui l'exploiteront. L'introduction du galvanomètre y sera un moyen d'investigation puissant. Mais, pour en tirer des mesures, il faudra soigneusement discerner et séparer les unes des autres, les causes diverses qui peuvent agir simultanément sur lui. Voilà surtout ce que j'ai voulu proposer à M. Edmond Becquerel. J'espère qu'il verra dans ce que je viens de lire, de nouveaux motifs pour continuer activement des recherches qu'il a commencées avec tant de sagacité. »

PHYSIQUE MATHÉMATIQUE. — *Note sur les milieux dans lesquels un rayon simple peut être complétement polarisé par réflexion; par* M. AUGUSTIN CAUCHY.

« Lorsque les équations des mouvements infiniment petits d'un système isotrope de molécules deviennent homogènes, elles se réduisent à celles que nous avons données dans la séance du 24 juin dernier (voir les *Comptes rendus*, 1er semestre, page 990), et renferment deux constantes désignées par les lettres ι et f. Si, d'ailleurs, le système isotrope que l'on considère est du nombre de ceux dans lesquels un rayon simple peut être complétement polarisé par réflexion, la constante f, comme nous l'avons prouvé dans la dernière séance, se réduira au signe près à l'unité, en vérifiant la formule

$$f = -1.$$

Donc alors, si l'on nomme, au bout du temps t,

$$\xi, \quad \eta, \quad \zeta,$$

les déplacements d'une molécule, mesurés au point (x, y, z) parallèlement aux axes coordonnés, et υ la dilatation du volume en ce même point, l'on aura

$$(1) \qquad \begin{cases} [D_t^2 - \iota(D_x^2 + D_y^2 + D_z^2)]\,\xi + \iota D_x \upsilon = 0, \\ [D_t^2 - \iota(D_x^2 + D_y^2 + D_z^2)]\,\eta + \iota D_y \upsilon = 0, \\ [D_t^2 - \iota(D_x^2 + D_y^2 + D_z^2)]\,\zeta + \iota D_z \upsilon = 0, \end{cases}$$

la valeur de υ étant

$$(2) \qquad \upsilon = D_x \xi + D_y \eta + D_z \zeta;$$

puis on en conclura, non-seulement

$$(3) \qquad D_t^2 \upsilon = 0,$$

concamérations. J'ai envoyé à notre confrère, M. Élie de Beaumont, des extraits allemands de quelques nouveaux Mémoires de M. Ehrenberg, et je te prie, mon cher ami, de vouloir bien l'engager à les faire traduire dans quelque journal scientifique. J'y ai aussi ajouté l'extrait de mon dernier Mémoire sur la composition des roches qui constituent le groupe des volcans de Quito. »

Berlin, ce 27 février 1840.

M. Héricart de Thury fait hommage à l'Académie d'un thermomètre qui a servi au Père Cotte pour ses observations météorologiques. Ce thermomètre a été construit en 1782 par Mossy, fabricant d'instruments, breveté par l'Académie; l'échelle sur verre a été gravée par Fortin. Malheureusement, dans son état actuel, l'instrument présente un défaut qui empêche qu'on en puisse faire usage pour une vérification importante : la détermination de la quantité dont le zéro s'est déplacé pendant les 58 années: l'ancienne position du zéro ne peut être rigoureusement connue, le tube jouant dans l'échelle.

CHIMIE APPLIQUÉE. — *Note sur un papier impressionnable à la lumière, destiné à reproduire les dessins et les gravures; par* M. Ed. Becquerel.

« Peu après la découverte de MM. Niépce et Daguerre, on a recherché différents papiers impressionnables à la lumière; à ma connaissance il n'y en a que deux ou trois qui donnent des dessins dans le même sens que la nature, c'est-à-dire qui représentent les ombres par les ombres et les clairs par des clairs. M. Bayard est parvenu à former un de ces papiers, et dans une des dernières séances de l'Académie, il a exposé le procédé à l'aide duquel il reproduisait depuis quelque temps les dessins de la chambre obscure. La préparation de ce papier exige l'emploi du nitrate d'argent.

» Il y a plusieurs mois, M. Ponton fit connaître un papier sensible; sa préparation consiste à plonger une feuille de papier dans une solution de bichromate de potasse, de faire sécher le papier et de l'exposer ainsi à la lumière; alors l'action de l'acide chromique sur le papier est telle, que les parties exposées au rayonnement se colorent peu à peu en prenant successivement les couleurs jaune foncé, puis bois foncé; ensuite, si l'on plonge le papier dans l'eau, tout le bichromate qui n'a pas été exposé à l'action solaire est dissous, et l'on n'a d'imprimées sur le papier que les parties qui ont été exposées à la lumière. A l'aide de ce papier, M. Ponton a copié des gra-

vures avec avantage. On obtient ainsi une représentation faible des objets, les ombres étant représentées par des clairs, *et vice versâ*, comme avec des papiers de chlorure ou de bromure d'argent. En étudiant l'action de l'acide chromique sur les matières organiques sous l'influence de la lumière, action sur laquelle je travaille en ce moment, j'ai été conduit à continuer le procédé de M. Ponton et je suis parvenu à produire un nouveau papier de manière à représenter dans le dessin produit par l'action du rayonnement solaire, les ombres par des ombres et les clairs par des clairs, et à donner non-seulement une autre teinte au dessin, mais encore plus de vigueur. Il suffit de plonger un papier préparé à la manière de M. Ponton et sur lequel il existe une représentation faible d'un dessin, dans une dissolution alcoolique d'iode, de laver ce papier dans l'eau puis de le faire sécher; alors les parties qui étaient blanches deviennent bleues, et celles qui étaient jaunes restent plus ou moins claires.

» Voici le détail et l'explication de ce procédé; ayant employé différentes sortes de papiers enduits de bichromate, je reconnus qu'ils n'étaient pas tous aptes à produire rapidement les dessins; que le mode de collage influait sur leur coloration à la lumière, et qu'avec du papier non collé cette coloration ne s'effectuait qu'à la longue; dès-lors je m'aperçus que la principale réaction avait lieu de l'acide chromique contenu dans le bichromate sur l'amidon qui entrait dans la colle du papier; alors comme l'amidon a la propriété de former avec l'iode une combinaison d'un très beau bleu, je pensai que sur les parties du papier qui n'avaient pas été exposées à l'action des rayons solaires, l'amidon ne s'étant pas combiné avec l'acide chromique, l'iode devait former l'iodure bleu et représenter ainsi les ombres par des ombres.

» Quand on veut, à l'aide de ce procédé, copier une gravure, on doit adopter la marche que j'ai suivie; on s'assure d'abord que le papier est bien collé et que l'amidon est répandu uniformément à sa surface; pour cela on le trempe dans une légère dissolution alcoolique d'iode, puis on le lave à grande eau : par cette seconde immersion, il doit prendre une belle teinte bleue que la première immersion ne lui donnait pas. Si cette teinte est uniforme, on juge le papier convenable à l'expérience; dans le cas contraire on pourrait le coller soi-même à l'amidon. Le papier à la mécanique convient mieux que les autres pour cet objet.

» On le trempe ensuite, comme l'a indiqué M. Ponton, dans une solution concentrée de bichromate de potasse; puis pour que le papier soit teint d'une manière uniforme, après quelques instants d'immersion, on le

comprime fortement entre des feuilles de papier brouillard, puis on le fait sécher, soit en le laissant dans du papier brouillard à l'obscurité, soit en l'approchant du feu. Ce papier, pour être bien impressionnable, doit être très sec. Quand il est ainsi enduit de bichromate, on le place sur une planche, puis on le couvre de la gravure que l'on veut copier, en ayant soin que le côté du dessin soit appliqué sur le papier sensible, et avec une plaque en verre munie de vis de pression, on presse ces deux papiers l'un contre l'autre, et on les expose ainsi aux rayons solaires. Après un temps qui varie de 30 secondes à 15 minutes, suivant l'épaisseur du papier de la gravure, le dessin est assez marqué (à la lumière diffuse ce temps serait plus long). On enlève la gravure, on lave le papier, puis on le fait sécher. Quand il est sec, on le trempe dans une légère dissolution alcoolique d'iode, et ensuite, lorsqu'il y a séjourné quelque temps, on le lave dans l'eau et on le fait sécher avec soin dans du papier **brouillard, mais pas au feu**, car à un peu avant 100° l'iodure d'amidon se décolore. Si l'on juge que le dessin n'est pas assez marqué, on répète plusieurs fois cette immersion; on peut par ce moyen obtenir l'intensité de ton que l'on veut donner au dessin, intensité que l'on ne pourrait pas changer à volonté en employant une dissolution d'iode plus concentrée.

» Quand le papier est humide, les ombres sont d'un très beau bleu, mais quand il est sec, la couleur devient violet foncé. J'ai reconnu que lorsqu'il est encore humide, si on le recouvre d'une couche de gomme arabique, la couleur du dessin se conserve en grande partie et est plus belle quand il est sec. Quand un papier est ainsi préparé, dans les premiers instants il perd un peu de son ton, mais ensuite il conserve sa teinte violacée.

» Au moyen de ce procédé, on copie avec fidélité des gravures et des dessins, et cela à un très bas prix, car la préparation est très peu dispendieuse et d'une facile exécution. Toutefois la vigueur du dessin produit n'est pas aussi grande que celle de la gravure, mais il n'en a pas la sécheresse. Les demi-teintes sont fidèlement reproduites, et cette copie se rapproche d'un dessin à l'estompe.

» L'Académie pourra juger de l'exactitude des faits d'après les épreuves que j'ai l'honneur de mettre sous ses yeux, et qui ne sont que des premières productions d'un procédé qui pourra être perfectionné.

» Les essais que j'ai tentés pour reproduire les images de la chambre obscure au moyen de ce papier impressionnable, n'ayant pas encore donné de résultats satisfaisants, je n'en entretiendrai pas l'Académie. »

PHYSIQUE. — *Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière solaire et la lumière électrique; par* M. **Ed. Becquerel.** (3e Mémoire. — Extrait par l'auteur.)

(Commissaires, MM. Biot, Arago, Savary.)

« On sait que la lumière solaire est non-seulement accompagnée de rayons calorifiques, mais encore d'autres rayons jouissant de la propriété d'opérer des réactions chimiques entre les éléments de certaines substances. Des recherches faites à ce sujet ont montré que chaque substance sensible était impressionnée par des portions différentes de ce rayonnement, et qu'à l'égard des sels d'argent, les rayons chimiques qui les noircissent étaient compris dans les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire, c'est-à-dire dans les rayons bleus, indigos, violets, et même au-delà des rayons violets.

» En reprenant l'étude de l'action chimique de l'agent qui accompagne la lumière, sur du papier enduit de bromure d'argent, j'ai trouvé que le rayonnement chimique comprenait au moins deux ordres de rayons agissant sur cette substance :

» 1°. Les rayons du premier ordre, ou *rayons excitateurs,* sont ceux déjà observés, possédant la faculté de commencer et de continuer une réaction chimique ou une coloration, et qui, dans le spectre solaire, comme on l'a déjà dit, sont compris depuis le bleu jusqu'au-delà du violet;

» 2°. Les rayons du second ordre, ou *rayons continuateurs,* possédant seulement la faculté de continuer une réaction commencée sous l'influence des premiers. Ces rayons sont compris dans le spectre depuis le rouge jusqu'à la limite du vert et du bleu.

» Le chlorure d'argent et les plaques d'argent iodurées jouissent des mêmes propriétés que le bromure relativement aux deux ordres de rayons.

» Cette continuation de coloration, qui a lieu sur les sels d'argent sous l'influence de certains rayons, ne s'opérerait pas à l'obscurité; il faut donc distinguer cette action de celle qui se manifeste sur le chlorure d'or. Ce corps, comme l'a observé Seebeck, après avoir été exposé à la lumière, continue à se colorer à l'obscurité, comme il aurait pu le faire en restant exposé à ce rayonnement. Ainsi le fait que j'annonce est essentiellement distinct du précédent.

» J'ai reconnu que lors de l'action des écrans de verre coloré sur le

rayonnement chimique de la lumière solaire, les verres rouges et vert foncé ne laissaient passer que les rayons continuateurs, et que les verres jaunes laissaient passer les deux ordres de rayons, d'abord les rayons continuateurs en très grande abondance, puis ensuite, et avec ceux-ci, les rayons excitateurs, mais en quantité moindre. Quant aux écrans de verre bleus, violets, etc., on ne peut distinguer leur action sur les deux ordres de rayons.

» En opérant avec des écrans liquides, incolores, je n'ai trouvé aucune action qui pût faire distinguer les deux sortes de rayons ; seulement lorsque ces liquides étaient de couleur rouge ou jaune, ils agissaient à peu près comme des écrans de verre de même couleur.

» Enfin, dans le Mémoire que j'ai l'honneur de soumettre au jugement de l'Académie, je prouve que la lumière émanée de l'étincelle électrique est également accompagnée d'un agent chimique qui influence les sels d'argent; et que les rayons continuateurs du rayonnement chimique solaire continuent aussi une réaction insensible commencée sous l'influence de la lumière électrique. »

PHYSIQUE APPLIQUÉE. — *Production artificielle de sons graves analogues à ceux de la voix humaine; par* M. CAGNIARD-LATOUR.

(Commissaires, MM. Magendie, Savart, Pouillet.)

« Diverses recherches que j'ai faites pour tâcher de découvrir par quel mécanisme la voix humaine a lieu, m'ont conduit à essayer d'étudier avec persévérance, comme on le ferait à l'égard d'un instrument de musique dont on voudrait savoir jouer, une espèce de larynx artificiel que je forme en appuyant d'une certaine manière ma bouche sur l'index et le médius de ma main gauche.

» Par les vibrations de ce système, lequel peut être considéré comme assez complet, en ce sens qu'il offre deux couples d'anches ou de lèvres laryngiennes, couples qui diffèrent même l'un de l'autre, à peu près comme ceux d'un larynx naturel, et une cavité intermédiaire analogue aux ventricules de Morgagni, je puis produire dans certaines circonstances une espèce de chant qui a de l'intensité quoiqu'il soit grave.

» Pour obtenir ce résultat, je fais en sorte que pendant mon insufflation dans ce larynx improvisé, les deux couples de lèvres vibrent simultanément, et que ces mouvements soient accompagnés de vibrations cellulaires ou ventriculaires, c'est-à-dire de celles qui ont lieu dans le ven-

Eau de	0,3336 à 0,3379
Alcool absolu	1,3633
à $\frac{10}{100}$ d'eau	1,3653
à $\frac{20}{100}$	1,3362
à $\frac{30}{100}$	1,3651
à $\frac{40}{100}$	1,3633
à $\frac{45}{100}$	1,3629
à $\frac{50}{100}$	1,3621
à $\frac{60}{100}$	1,3592
à $\frac{70}{100}$	1,3544
à $\frac{80}{100}$	1,3471
à $\frac{90}{100}$	1,3407
Alcool conten. quelq. traces d'eau	1,5639
à $\frac{2}{100}$	1,3641
Alcool du commerce à près de $\frac{20}{100}$	1,3660
Acide acétique cristallisable	1,3757
Acide au maximum de densité	1,3781
Acide à une densité de 1,0728	1,3712
Acide à 1,063	1,3701
Essence de térébenthine	1,472
Camphre liquide de térébenthine	1,4848
Bromhydrate liquide d'essence de térébenthine	1,5109
Chlorure d'essence de térébenth.	1,5448
Térébène	1,474
Chlorotérébène	1,5294
Monochlorotérébène	1,5186
Térébilène	1,4735
Colophène	1,5212
Colophilène	1,5175
Essence de citron	1,472
Essence d'élémi	1,4718
Essence de copahu pure	1,471
— vieille	1,504
Acide chlorovalérosique	1,4814
Acide chlorovalérisique	1,4722
Acide valérique	1,406
Rétinilène	1,5214
Rétinaphtène	1,4975
Essence de clous de girofle	1,502
Carbure d'hydrogène de l'acide éthalique	1,4508
Éther pur	1,3562
Essence de genièvre	1,474
Essence d'orange	1,474
Essence de bigarade	1,476
Essence de bergamotte	1,468
Essence de menthe sèche	1,4663
— humide	1,465
Essence de citron vieille	1,4808
Acétate de méthylène	1,3631
Éther formique	1,3639
Pétrolène de M. Boussingault	1,4855
Essence de térébenthine épaissie et à une température de 40° à peu près, où elle est très liquide	1,4898
Essence épaissie et froide	1,4938

OPTIQUE. — *Recherches sur les pouvoirs réfringents des liquides; par* MM. **Edmond Becquerel** et **Auguste Cahours**.

(Commissaires, MM. Biot, Arago, Babinet, Regnault.)

« Les résultats que nous avons l'honneur de mettre aujourd'hui sous les yeux de l'Académie ne sont que le commencement d'un travail très étendu que nous avons entrepris sur la détermination des pouvoirs réfringents et dispersifs des liquides. Les nombres donnés jusqu'à présent pour les indices de réfraction ne s'appliquant, pour la plupart du temps, qu'à des corps dont la constitution n'est pas bien établie, nous avons cru devoir reprendre cette question en prenant pour point de départ des corps très purs, sur la composition desquels les chimistes sont bien fixés. Nous

étant procuré un grand nombre de liquides dont quelques-uns forment des séries bien distinctes, nous donnons aujourd'hui les indices moyens de réfraction de ces liquides, nombres qui, déterminés avec précision, nous conduiront peut-être à quelques relations sur leur constitution.

» M. Brewster, qui a donné un très grand nombre de déterminations d'indices de réfraction, mais souvent de corps impurs, s'est servi d'un procédé très commode, que nous avons suivi en le modifiant comme nous allons le dire.

» Le procédé de M. Brewster consiste à placer sous l'objectif d'un microscope, et tangente à la lentille, une lame de verre bien plane, puis d'interposer entre cette lentille et la lame plane une goutte du liquide dont on veut mesurer l'indice de réfraction. Il se forme donc à l'extrémité de l'objectif une lentille plan-concave de liquide, qui fait changer la position dans laquelle il faut placer un corps pour que son image se forme toujours au même point. Alors, en désignant par n, n', les indices de réfraction de deux liquides en passant de l'air dans ces corps, par D, d, d', les distances auxquelles il faut placer un objet quelconque pour qu'il soit vu dans le microscope lorsqu'il y a successivement de l'air et chacun des deux liquides entre la lame plane et l'objectif, distances que l'on compte à partir de l'objectif, on a cette formule facile à trouver

$$\frac{n-1}{n'-1}=\frac{\frac{1}{D}-\frac{1}{d}}{\frac{1}{D}-\frac{1}{d'}}, \quad \text{ou} \quad \frac{n-1}{n'-1}=\frac{1-\frac{D}{d}}{1-\frac{D}{d'}}.$$

On ne peut donc obtenir par ce moyen que l'indice de réfraction d'un liquide par rapport à un autre liquide.

» Nous avons modifié ce procédé en cherchant, au lieu des distances D, a, a', les nombres P, p, p', de division d'un micromètre placé sur le porte-objet, et qui sont comprises entre deux raies fixes d'un micromètre situé au foyer de l'oculaire. Ces nombres sont, comme il est facile de le démontrer, proportionnels aux précédents, et l'on a encore

$$\frac{n-1}{n'-1}=\frac{1-\frac{P}{p}}{1-\frac{P}{p'}};$$

et ils ont l'avantage de pouvoir être observés plus rapidement et peut-être avec plus d'exactitude.

» Le liquide auquel nous avons rapporté les indices de réfraction est l'eau distillée. Nous avons adopté le nombre $n = \frac{1}{4} = 1,3333$ pour l'indice moyen de ce corps.

» Du reste, à l'aide de la méthode suivante, on peut déterminer ce nombre directement. Cette méthode consiste à interposer entre l'objectif d'un microscope et un objet que l'on regarde un écran liquide à faces parallèles. Alors, comme il est facile de le démontrer, il faut abaisser l'objet pour continuer à le voir dans le microscope, car les rayons lumineux, quoique ressortant parallèles après avoir traversé l'écran, éprouvent une déviation de leur direction primitive; en désignant donc par e l'épaisseur de l'écran, et par d la quantité dont on a éloigné l'objet de sa position primitive, on a

$$d = e\left(\frac{n-1}{n}\right),$$

n étant l'indice de réfraction. Cette formule très simple peut donner aussi directement l'indice de réfraction d'un corps solide.

» En appliquant cette méthode à l'eau distillée, nous avons trouvé que e étant égal à 10^{mm}, on avait

$$d = 2^{mm},502.$$

On a donc

$$\frac{n-1}{n} = 0,2502 \quad \text{d'où} \quad n = 1,3336,$$

c'est-à-dire $n = \frac{4}{3}$, la différence de 0,003 étant ici insignifiante.

» Nous donnons, à la suite de cette Note, le tableau des différents nombres obtenus à l'aide du premier procédé que nous avons indiqué. Il résulte de l'examen de ce tableau :

» 1°. Que les corps de même composition et dont la densité à l'état liquide est représentée par des nombres peu différents, possèdent un indice de réfraction qui varie dans de très faibles limites; tandis que celui-ci s'accroît au contraire avec l'état de condensation de la substance (exemple, essence de térébenthine et colophène).

» 2°. Que les carbures d'hydrogène liquides, à densité presque égale, ont un pouvoir réfringent d'autant plus considérable que le carbone s'y accumule davantage : ainsi, par exemple, le rétinolène ($C^{64}H^{32}$) possède un indice de réfraction moyen beaucoup plus grand que le cétène ($C^{64}H^{64}$), qui contient beaucoup moins de carbone que lui, et dont la densité à l'état liquide est peu différente.

» 3°. Que pour les liquides formés de carbone, d'hydrogène et d'oxigène,

l'indice de réfraction et le pouvoir réfringent, sont d'autant plus considérables que la substance est moins oxigénée, pourvu toutefois que la densité de ces corps soit peu différente; mais si la densité varie dans des limites très sensibles, alors le contraire peut avoir lieu; ce qui démontre évidemment que la densité du corps à l'état liquide est un élément qui a une grande influence. Ainsi l'éther cuminique, qui renferme moins d'oxigène pour cent que l'éther benzoïque, possède un indice de réfraction moindre que ce dernier, mais aussi la densité du premier est moindre que celle de l'eau, tandis que la densité du second est plus considérable. Nous pourrions faire encore une observation semblable à l'égard des éthers acétique et oxalique.

» 4°. Que pour les corps isomères, tels que l'acétate de méthylène et l'éther formique, qui possèdent en outre une densité presque identique à l'état liquide, les indices de réfraction sont aussi identiques.

» 5°. Qu'à mesure que le chlore, le brome ou l'iode s'accumule dans les corps d'une même famille, l'indice de réfraction s'accroît, ce qui tient peut-être à l'augmentation de densité de ces corps à l'état liquide.

» 6°. Enfin nous avons observé qu'il est un autre élément dont l'intervention peut avoir une influence très marquée sur l'indice de réfraction, c'est la viscosité de la substance. C'est ce qui résulte aussi des observations de M. Henri Deville, sur les acides chlorovalérisique et chlorovalérosique.

» Nous avons recherché si, dans un mélange de liquides qui sont sans action chimique l'un sur l'autre, le pouvoir réfringent du mélange était égal à la somme des pouvoirs réfringents des liquides qui le constituent; d'après les diverses expériences faites à ce sujet, cette loi nous a paru être sensiblement vraie. Voici quelques-uns des résultats obtenus :

Mélanges d'alcool et d'essence d'élémi.

	Indice ou n.	$n^2 - 1$.	Densités à 9° centig.	
Alcool	1,357	0,841	0,802	
Essence d'élémi	1,475	1,175	0,849	
1er mélange	1,411	0,990 (observé). 0,990 (calculé).	0,823	contient donc 1vol,258 d'alcool. 1vol. d'ess. d'élémi.
2e mélange	1,397	0,952 (observé). 0,955 (calculé).	0,818	contient donc 1vol,937 d'alcool. 1vol. d'ess. d'élémi.

Mélange d'essence de genièvre et de chlorhydrate d'essence de térébenthine.

	Indice ou n.	$n^2 - 1$.	Densités à 9° centig.	
Essence de genièvre	1,476	1,175	0,8635	
Chlorhyd. d'ess. de téréb.	1,488	1,214	1,019	
Mélange	1,479	1,187 (observé). 1,195 (calculé).	0,944	contient donc 0vol,931 d'ess. de genièvre. 1vol de chlorhydrate.

» Nous n'avons l'honneur de présenter aujourd'hui à l'Académie ce petit nombre d'observations qu'afin de prendre date; dans un prochain travail nous examinerons les pouvoirs dispersifs des liquides qui font partie du tableau que nous avons donné, ainsi que d'autres dont la composition est pareillement bien établie. Nous étudierons en outre les variations qu'éprouvent les pouvoirs réfringents et dispersifs des liquides dans l'acte de la combinaison, nous proposant surtout de comparer les résultats que nous obtiendrons par différentes méthodes, afin d'en discuter la valeur.

P (Air).... 20,8
p (Eau).... 34,33
} On admet pour l'indice de l'eau.... $n = 1{,}3333$, ou $\frac{4}{3}$.

Tableau des indices moyens.

NOMS DES SUBSTANCES.	Nombres. p'	Indices.	NOMS DES SUBSTANCES.	Nombres. p'	Indices.
Essence de térébenthine.....	47	1,471	Éther citrique.....	44	1,446
— de citron.....	47,5	1,475	— pyrocitrique.....	44	1,446
— d'élémi.....	47,5	1,475	— camphorique.....	45,5	1,459
— de genièvre.....	47,5	1,475	— cuminique.....	51,5	1,504
Térébène.....	48	1,479	— benzoïque.....	52,5	1,511
Térébilène.....	48	1,479	Acétate de méthylène.....	36,33	1,361
Essence de Cubèbes.....	49,5	1,490	Éther formique.....	36,33	1,361
Colophène.....	53,5	1,517	Hydrure de benzoïle.....	58,5	1,545
Colophilène.....	53,5	1,517	Hydrure de salicyle.....	65	1,570
Eupione.....	40,33	1,409	Alcool absolu.....	36,33	1,361
Cétène.....	45	1,463	Acide acétique cristallisé....	37,5	1,376
Benzène.....	51,5	1,504	Essence de térébenthine.....	47	1,471
Cinnamène.....	56	1,531	Chlorhydrate d'essence liquide	49	1,488
Rétinolène.....	65,5	1,577	Bromhydrate d'essence liquide	52,5	1,510
Cymène.....	48,75	1,485	Monochlorotérébène.....	55,33	1,531
Naphte.....	40,33	1,409	Chlorure d'essence.....	57,5	1,540
Rétinylène.....	53,5	1,517	Acide valérique.....	39,8	1,406
Rétinnaphtène.....	51	1,500	— chlorovalérisique.....	50,5	1,497
Naphtole.....	45,3	1,467	— chlorovalérosique.....	52,5	1,510
Carbure d'hydrogène de l'acide éthalique.....	44,5	1,450	Benzène.....	51,5	1,504
Éther.....	36	1,357	Nitrobenzide.....	60,33	1,554
— hydrobromique.....	41	1,417	Hydrocarbure de chlore.....	44	1,446
— hydriodique.....	52,75	1,512	Hydrocarbure de brome.....	56,5	1,534
Éther formique.....	36,33	1,361	Acétone.....	37,5	1,376
— acétique.....	37	1,370	Acétate d'amilène.....	39,75	1,406
— oxalique.....	39,75	1,406	Huile de girofle.....	51,5	1,504
— œnanthique.....	42	1,427			

même, le terme indépendant de $e^{\psi\sqrt{-1}}$ dans le développement du rapport

$$\frac{1-\varepsilon\cos\psi}{v},$$

il est avantageux de remplacer les équations (4) et (5) par les deux suivantes

$$v^2 = 2aa'[\lambda - \cos(\psi' - \psi + \Pi) + \varepsilon],$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\frac{a}{a'}\left(\frac{r^2}{a^2} - 1\right) + \frac{1}{2}\frac{a'}{a}\left(\frac{r'^2}{a'^2} - 1\right) - \frac{rr'}{aa'}\cos\delta + \cos(\psi' - \psi + \Pi),$$

dont la seconde fournit une valeur de ε qui renferme seulement les premières et les secondes puissances des exponentielles

$$e^{\pm\psi\sqrt{-1}},\ e^{\pm\psi'\sqrt{-1}}.$$

Alors aussi l'on peut appliquer à la recherche des coefficients renfermés dans le développement de $\frac{1}{v}$ une nouvelle méthode d'interpolation fondée sur les propriétés des racines de certaines équations réciproques. C'est au reste ce que je montrerai plus en détail dans un autre article. »

M. **Dutrochet** dépose deux paquets cachetés portant pour suscription, l'un: *Sur les mouvements du camphre;* l'autre: *Sur les variations diurnes de l'aiguille aimantée.*

RAPPORTS.

PHYSIQUE. — *Rapport sur un Mémoire de* M. **Edmond Becquerel**, intitulé: *Recherches sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire, et la lumière électrique.*

(Commissaires, MM. Arago, Savary, Biot rapporteur.)

« L'Académie a chargé, MM. Arago, Savary et moi (M. Biot) d'examiner un Mémoire de M. Edmond Becquerel, contenant des recherches sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire, et la lumière électrique. Nous allons avoir l'honneur de lui en rendre compte.

» Les découvertes de M. Niépce et de M. Daguerre ont offert aux physiciens un vaste champ de phénomènes qu'ils ne font que commencer à explorer, mais où leurs premiers pas ont déjà fait reconnaître l'existence d'une multitude d'actions physiques, jusque alors incomplétement soupçonnées, qui paraissent avoir une influence très puissante, comme très diverse, sur les combinaisons, et les décompositions chimiques des corps. Dans un concours d'efforts si récents, et dont le sujet paraît si étendu qu'on ne saurait prévoir où il pourra conduire, il serait presque impossible d'assigner déjà à chacun des faits successivement reconnus leur valeur, et surtout leur portée véritable. C'est pourquoi, sans hasarder une appréciation aussi délicate, nous nous bornerons à rappeler qu'on est arrivé à ce résultat général, savoir : que, de chaque point des corps, il dérive continuellement une infinité de radiations rectilignes, résultantes d'une émission matérielle, ou d'ondulations propagées ; susceptibles d'être absorbées, réfléchies, réfractées; et qui, selon les qualités propres, attachées à leur nature ainsi qu'à leurs vitesses actuelles, peuvent produire la vision, la chaleur, ou déterminer certains phénomènes chimiques, lorsqu'elles sont reçues par des substances, ou par des organes, sensibles à leurs impressions. Ce que nous appelons *la lumière*, n'est qu'une spécialité de ces radiations, qui se trouve apte à impressionner notre rétine lorsqu'elles arrivent à l'œil avec certains degrés de vitesse. Chaque substance, vivante ou non vivante, organisée ou non organisée, est, de même, plus ou moins sensible à certaines portions de la radiation totale, que nous parvenons à distinguer les unes des autres, soit par leur réfrangibilité diverse, soit par leur inégale aptitude pour être absorbées par les mêmes milieux. Et les substances ainsi affectées, éprouvent souvent, sous cette influence, une excitation qui a pour résultat la séparation de leurs éléments constituants chimiques, ou qui les dispose à former des combinaisons que nous ne pourrions pas autrement déterminer.

» M. Edmond Becquerel ajoute à ces notions le fait suivant, dont l'établissement est l'objet spécial de son Mémoire : *Des rayons qui ne peuvent pas impressionner sensiblement une substance préparée à l'abri de toute radiation, peuvent continuer très vivement l'action que des rayons différents auraient commencé à exercer sur elle.* En conséquence, il appelle ceux-ci *rayons excitateurs*, et les autres *rayons continuateurs*. C'est l'expression immédiate de l'effet qu'il a observé. Nous verrons tout-à-l'heure qu'on peut encore l'énoncer sous une autre forme, qui nous semble mon-

trer plus évidemment sa connexion avec les phénomènes déjà connus; mais d'abord nous adopterons le langage de M. Becquerel.

» Il a constaté ce fait remarquable, par deux genres d'expériences que nous avons employées avec lui pour le vérifier, et nous allons les décrire successivement.

» Le premier consiste à briser, par le prisme, un trait de lumière solaire introduit dans la chambre obscure, et à faire agir séparément les diverses portions de la radiation totale ainsi réfractée. L'état brumeux du ciel rend cette expérience difficile dans la saison actuelle; cependant nous avons pu la faire une fois. M. Becquerel annonce, dans son Mémoire, l'avoir vu réussir sur les papiers imprégnés de bromure ou de chlorure d'argent, et sur les plaques d'argent iodurées. Nous ne l'avons vérifiée qu'avec les papiers bromurés, dont les modifications s'aperçoivent plus immédiatement; mais l'analogie avec les plaques iodurées rend très concevable que le même effet ait lieu pour elles. M. Becquerel n'a rien vu s'opérer de pareil sur la matière sensible du gaïac, ni sur l'acide chromique. Il remarque, avec raison, que cette succession d'effets ne peut pas être observée sur le chlorure d'or; mais, loin que ce soit une exception, cela nous paraît être plutôt une extension de la nouvelle propriété qu'il a découverte.

» Ayant jeté dans une chambre obscure un spectre lumineux horizontal, dont la direction longitudinale contenait tous les éléments tant visibles qu'invisibles de la radiation solaire, séparés et dispersés suivant l'ordre de leurs réfrangibilités respectives, on a préparé une longue feuille de papier sensible, en l'imprégnant d'abord d'une solution de bromure de potassium, la faisant sécher, et recouvrant ensuite la couche de bromure par une solution de nitrate d'argent, dans la chambre obscure même. Ce procédé a été indiqué par M. Talbot. On sait, ou du moins on croit savoir, qu'il s'opère alors un échange de bases, d'où résulte une formation immédiate de nitrate de potasse et de bromure d'argent, dans un état tel que ce dernier sel se trouve extrêmement sensible à l'action des radiations les plus réfrangibles. Quand la feuille ainsi préparée a été bien séchée, on l'a partagée en deux bandes A et B, dont l'une B a été enfermée soigneusement à l'abri de toute radiation, tandis que l'autre A a été immédiatement placée dans le spectre, de manière à recevoir sur sa longueur l'action de toutes les radiations de diverses réfrangibilités comprises non-seulement dans l'amplitude visible du spectre, mais encore au-delà de cette amplitude jusqu'à une certaine distance, principalement du côté de l'extrémité

rouge. Après peu de temps, le papier s'est impressionné dans les parties exposées aux radiations les plus réfrangibles, concordantes avec les rayons visibles bleus, indigos, violets, et même au-delà. Mais la portion exposée aux radiations les moins réfrangibles, concordantes avec les rayons visibles verts, jaunes, orangés, rouges, n'a éprouvé aucune coloration appréciable, même après un séjour assez prolongé pour que tout le reste de la bande fût déjà très notablement noirci. M. Edmond Becquerel a inséré dans son Mémoire une figure qui représente l'amplitude de coloration de la bande de papier, dans cette circonstance, telle que l'expérience nous l'a fait voir.

» Alors on a pris la bande de papier sensible B, qui avait été, jusque alors, tenue enfermée à l'abri de toute radiation; et on l'a recouverte d'une bande de carton épais, plus longue et plus large, qui était, sur toute sa longueur, découpée par bandes transversales, alternativement vides et pleines. Puis, on l'a présentée un seul instant, peut-être pendant moins d'une seconde, à la radiation solaire directe, sous cet abri partiel. En ramenant le tout dans la chambre obscure, et découvrant le papier, pour le regarder à la lueur d'une bougie, on pouvait déjà entrevoir, dans toute sa longueur, quelque faible trace de coloration sur les bandes vides que la radiation avait frappées. Mais, en le portant dans le spectre, ces bandes prirent bientôt une teinte noire beaucoup plus forte, sous l'influence des radiations invisibles correspondantes aux réfrangibilités des rayons verts, jaunes, orangés et rouges; tandis que leurs intervalles, primitivement non impressionnés, demeuraient tout-à-fait insensibles. Dans tout le reste du spectre, au contraire, la coloration, d'abord un peu plus marquée sur les bandes impressionnées, s'est bientôt étendue uniformément. Après quelque temps, la coloration des bandes impressionnées, situées vers l'extrémité la moins réfrangible, s'est montrée au plus haut degré d'intensité dans la plage correspondante aux rayons verts; étant là aussi forte, ou presque aussi forte, que dans les violets; et se dégradant des deux côtés autour de ce maximum. Au lieu qu'il ne s'était opéré aucune trace d'action dans cette même plage, quand la bande n'avait pas été préalablement exposée à la radiation générale. Des expériences ultérieures nous ont appris que cette exposition ne peut être trop courte, ni la chambre trop complétement obscure, ni le carton protecteur trop épais. Il faut même se méfier de la bougie, dont la flamme n'est pas absolument dépourvue de radiation excitante. Mais la nécessité reconnue de toutes ces précautions ne fait que confirmer davantage le fait important découvert et annoncé par M. Ed-

mond Becquerel, savoir : que *certains rayons, inhabiles à exercer primitivement une action sur le papier, sont très propres à continuer cette action, quand elle a été commencée par d'autres.*

» Remarquons toutefois que la succession des résultats ainsi obtenus pourrait encore s'exprimer d'une manière différente, qu'il nous semble essentiel d'indiquer. On sait, d'une part, que les substances de nature dissemblable, sont généralement sensibles à des portions diverses de la radiation totale. D'une autre part, le fait primordial découvert par Niépce, et depuis si heureusement étendu, varié, appliqué par M. Daguerre, montre que les substances en s'impressionnant changent de nature, puisque les portions inégalement impressionnées deviennent inégalement sensibles à l'action chimique des mêmes milieux, liquides ou aériformes; et c'est là ce qui produit la distinction des linéaments de l'image dans les dessins ainsi obtenus. Pareillement, pour les papiers sensibles, on ne peut douter que le bromure d'argent impressionné, et plus ou moins noirci, ne soit devenu différent du bromure non impressionné. Nous n'avons pas besoin de spécifier si la modification dont il s'agit est chimique ou mécanique; c'est-à-dire si elle consiste dans la séparation et la dissipation d'un des principes, par exemple du brome, du chlore, de l'iode, ou dans un autre arrangement moléculaire des principes entre eux. Car ces deux modes d'altération pourraient également amener un degré différent de sensibilité aux mêmes réactifs chimiques, ou aux mêmes sortes de radiations. Dans cette seconde manière de voir, le phénomène observé par M. Edmond Becquerel peut s'énoncer, en disant que *le papier impressionné, et modifié, devient sensible à des portions de la radiation auxquelles il était primitivement insensible.* Ce qui rattache ainsi le nouveau phénomène à l'ensemble de ceux que l'on connaissait précédemment.

» M. Edmond Becquerel a reproduit les mêmes résultats, en substituant aux radiations séparées par le prisme les portions de la radiation totale, transmises par des verres colorés de nature diverse. Nous n'avons pas négligé ce moyen de confirmation. Mais nous rapporterons seulement une des expériences auxquelles nous l'avons appliqué.

» Elle a été faite avec un verre rouge qui, étudié par le prisme en prenant la flamme d'une bougie pour corps lumineux, ne transmettait à l'œil qu'une image simple de couleur rouge, terminée par un peu d'orangé. Néanmoins, quelques particularités qu'il nous a présentées nous portent à croire qu'il devait transmettre aussi une petite proportion de rayons invisibles, d'une réfrangibilité plus grande que celles-là. Ayant préparé une

feuille de papier sensible, dans l'obscurité, en l'imprégnant successivement de bromure de potassium, puis de nitrate d'argent, comme on l'a expliqué plus haut, on en a coupé deux morceaux pareils que l'on a successivement placés au fond d'une boîte de bois, où ils étaient entièrement recouverts par une plaque métallique dont la portion centrale était découpée en parties vides et pleines, figurant les contours d'un bouquet de fleurs. Le tout encore a été soigneusement recouvert d'une planche épaisse, puis porté hors de la chambre obscure au-devant d'une fenêtre ouverte au nord. Alors, enlevant rapidement l'obturateur en bois, puis le replaçant aussi vite qu'on a pu le faire, les parties du papier qui répondaient aux vides de la plaque métallique se sont trouvées ainsi exposées, certainement pendant moins d'une seconde, à la radiation diffuse du ciel brumeux de ces derniers jours. Toutefois, après avoir reporté le papier dans la chambre obscure, en le retirant de dessous la plaque métallique et le considérant avec attention sous diverses faces, à la lumière d'une bougie, on y entrevoyait une trace infiniment légère du dessin qu'on savait, ou qu'on présumait, devoir y exister. Celui des deux papiers où l'on a cru reconnaître le plus distinctement cette trace a été soigneusement serré et enfermé à l'abri de toute radiation, pour servir ultérieurement comme type comparable; l'autre, le moins impressionné, a été replacé au fond de la boîte, recouvert par le verre rouge à distance, et abrité de tous côtés par plusieurs doubles de papier noir collés les uns sur les autres dans tous les interstices par lesquels les radiations, ou l'air ambiant lui-même, auraient pu pénétrer latéralement. Cela fait, l'appareil a été exposé à la radiation diffuse du ciel, du côté du nord et vers le zénith; de manière que le papier la pouvait uniquement recevoir à travers le verre rouge, tant sur les parties de sa surface qui avaient été exposées un seul instant à la radiation directe, que sur celles que l'interposition du métal en avait préservées. On laissa continuer ainsi l'action depuis une heure du soir jusqu'à cinq. Alors, en démontant l'appareil dans l'obscurité, le bouquet parut très visiblement dessiné en noir sur un fond blanc; les portions du papier qui avaient reçu la radiation directe étant seules noircies, et les parties qui en avaient été préservées n'ayant éprouvé aucune action appréciable. Quant à l'autre papier qui avait été mis à l'abri de toute radiation, il avait conservé son état primitif, et l'image n'y était devenue ni plus ni moins discernable; de sorte que c'était un contraste frappant d'observer ces deux papiers à côté l'un de l'autre. C'est ce que M. Savart a reconnu comme nous, et il nous a autorisés à nous appuyer de son témoignage. Ainsi, sur le papier recouvert

du verre rouge, l'image s'était développée en l'absence de l'objet. Elle y existait donc d'abord, invisiblement définie et tracée par l'action instantanée de la radiation directe; et pour qu'elle ait pu ensuite ressortir visible sur le reste blanc du papier, il a fallu que ce reste demeurât insensible, ou à peine sensible, à la radiation transmise par le verre rouge, tandis que les portions qui avaient vu un instant le ciel à travers les vides de la plaque métallique continuaient de s'impressionner sous l'influence de cette même radiation transmise, et efficace pour elles seules. C'est précisément là le fait que M. E. Becquerel a voulu établir; et cette expérience, qui lui appartient, que nous avons seulement répétée avec lui, confirme pleinement les résultats obtenus en éprouvant l'action des radiations d'inégale réfrangibilité, après les avoir séparées par le prisme (1).

» On sait que les papiers sensibles, préparés selon la première méthode de M. Talbot, par la décomposition réciproque du chlorure de sodium et

---

(1) L'expérience a été répétée aujourd'hui avec des circonstances encore plus décisives. Ce matin, à 8 heures, on a pris un papier qui, depuis trois jours, avait été imprégné de bromure de potassium, de sorte qu'il était devenu parfaitement sec; puis on l'a imprégné de nitrate d'argent dans la chambre obscure, en s'éclairant par la seule lueur d'une bougie tenue très distante; et enfin on a opéré la dessiccation par la chaleur obscure, en l'appliquant sur un vase d'étain rempli d'eau chaude. Cela fait, on a coupé comme précédemment, dans ce papier, deux morceaux pareils, et les ayant successivement placés dans l'appareil d'exposition, recouverts par la vignette métallique découpée, on les a présentés pendant un instant le plus court possible à la radiation diffuse du ciel, alors excessivement brumeux, du côté du nord. Après les avoir retirés dans l'obscurité, ils n'offraient, ni l'un ni l'autre, aucune trace d'impression appréciable à l'examen le plus attentif. On a conservé l'un d'eux bien enfermé à l'abri de toute radiation, et l'on a exposé l'autre sous le verre rouge à la radiation zénithale du ciel. A une heure après midi on l'a ramené dans la chambre obscure; et, enlevant le verre rouge, on a vu le dessin très distinctement tracé, ce qui a été constaté avec nous par un habile professeur de physique, M. Masson, qui se trouvait alors dans les cabinets du Collége de France. Cette observation faite, on a replacé le verre rouge et exposé le tout de nouveau à la radiation zénithale. Le soir, en découvrant le papier, on a trouvé le dessin bien plus fortement marqué, tandis qu'il ne s'en était développé aucune trace sur le morceau qui avait été tenu à l'abri de toute radiation, deux résultats que M. Savart a constatés avec nous. Le fait annoncé par M. Becquerel est donc indubitablement vérifié par cette seconde épreuve. On a renfermé soigneusement ces deux papiers; et, s'ils ne s'altèrent pas d'ici à lundi prochain, on exposera à la radiation sous le verre rouge celui où le dessin est encore invisible, pour voir s'il se manifestera. On rendra compte du résultat à l'Académie, dans sa séance prochaine.

du nitrate d'argent, sont faiblement impressionnables par la radiation artificielle d'une lampe Locatelli. On devait présumer que cela aurait lieu aussi, et même à un degré plus marqué, pour les papiers où le chlorure est remplacé par un bromure. Comme l'intensité de cet effet n'était pas inutile à connaître pour l'exactitude des expériences précédentes, puisque les papiers sont éclairés par la flamme d'une bougie lorsqu'on les prépare, nous avons voulu la constater. Pour cela, ayant taillé, comme précédemment, deux morceaux pareils dans une même feuille de papier bromuré, nous les avons successivement présentés à la radiation diffuse du ciel sous la plaque métallique découpée, en tâchant de rendre le temps de l'exposition aussi court que possible; puis, nous avons conservé l'un d'eux dans une obscurité complète, bien abrité de toute radiation visible, et nous avons exposé l'autre dans la chambre obscure, à la radiation d'une lampe Locatelli à trois becs, munie d'un réflecteur métallique. Il s'est impressionné sensiblement en peu de minutes, et d'abord sur les parties qui avaient vu un instant le ciel à travers les découpures de la plaque métallique; de manière que le dessin du bouquet est devenu ainsi parfaitement distinct sur le reste du fond encore blanc, comme M. Savart a bien voulu le constater encore avec nous. Mais, peu à peu, le reste du papier a commencé aussi à se colorer; et l'intensité de sa teinte s'accroissant toujours, tandis que celle du dessin ne dépassait pas un certain maximum où elle était parvenue d'abord, la différence qui faisait apercevoir l'image est devenue graduellement moindre; et le tout a fini par se fondre en une teinte uniforme, mais beaucoup moins foncée que ne l'aurait produite la radiation directe du ciel. Ainsi, la flamme envoyait au papier deux sortes de rayons chimiques: les uns, en quantité très faible, capables de l'impressionner immédiatement sur toute sa surface; et les autres, en proportion beaucoup plus abondante, capables d'influencer seulement les portions qui avaient déjà reçu un moment la radiation directe du ciel. C'est encore l'expérience de M. E. Becquerel sous une autre forme. Mais, puisque les flammes artificielles émettent des radiations capables d'impressionner immédiatement le papier bromuré, la flamme de la bougie agira déjà sur lui pendant qu'on le prépare. Or cette influence doit avoir deux effets, dont l'un consiste à établir d'avance, sur toute la surface du papier, un commencement de teinte uniforme qui rendra la distinction ultérieure de l'image moins facile; tandis que l'autre peut accélérer la formation de cette image en rendant le papier immédiatement sensible à des radiations qui ne l'auraient pas affecté, s'il n'avait pas d'abord éprouvé cette première action.

La même cause influe sans doute sur les plaques d'argent iodurées, lorsqu'on les examine pendant leur préparation, pour voir si la couche d'iode dont elles sont chargées est suffisamment épaisse. Il ne sera pas inutile d'étudier les conséquences définitives que cette première impression, si faible qu'elle soit, peut avoir sur les représentations que l'on cherche à obtenir par ces divers procédés; car aucun détail n'est à négliger dans des opérations dont le succès dépend de tant de circonstances délicates, et encore si peu connues.

» Les expériences de M. Edmond Becquerel prouvent que les images sont déjà invisiblement tracées sur les papiers, et sur les plaques, dès le premier instant que la radiation efficace agit sur leur surface. Cela résultait aussi antérieurement des épreuves mêmes que M. Daguerre avait faites pour constater l'excessive sensibilité de la couche d'iode déposée sur les plaques d'argent. La condition, tant desirée, de la rapidité de l'art photogénique doit donc consister, non pas à créer ou à fortifier l'image en prolongeant l'action de la radiation émanée de l'objet, mais à la rendre manifeste en l'absence de l'objet, soit, comme l'a fait M. E. Becquerel, en soumettant le papier, ou les plaques, à des radiations d'une telle nature, qu'elles s'exercent seulement sur les portions de la surface déjà impressionnées, étant inefficaces pour les autres; soit en cherchant des réactifs qui aient sur ces parties une action chimique différente, comme cela a lieu dans les premières expériences de Niépce, et dans les opérations plus parfaites de M. Daguerre. En indiquant la possibilité de ce second mode de manifestation comme une conséquence de l'instantanéité du tracé, les commissaires n'ont pas du tout l'intention de supposer, ou de prévoir, que M. Daguerre ait dû suivre cette voie pour obtenir des tableaux résultants d'une impression qui ne dure qu'un moment, comme il vient de l'annoncer à l'Académie; et ils sont très loin de méconnaître combien la formation d'une figure, par la seule limitation géométrique de l'action directe, est moins difficile que la formation d'un dessin distinct des objets naturels, obtenu par réfraction dans la chambre obscure. Ils se bornent à signaler un principe physique résultant des expériences qu'ils ont dû examiner dans le présent rapport; et celui d'entre eux qu'ils ont chargé de le rédiger n'a, par lui-même, non plus que par le Mémoire de M. Becquerel, aucune notion du réactif chimique qui pourrait manifester l'image instantanément formée, soit sur la plaque iodurée, soit sur toute autre substance impressionnable. L'existence de cette image invisible est la seule chose qui leur soit prouvée; et sa manifestation, par l'action continue des rayons

devenus localement efficaces, est le seul mode qu'ils aient vu réalisé dans les expériences dont ils viennent de rendre compte.

» M. E. Becquerel a cherché si les impressions instantanément produites sur les papiers sensibles par les radiations qui accompagnent la lumière électrique seraient continuées par celles qui accompagnent la radiation solaire, et il s'est assuré que cela avait lieu. Le temps nous a manqué pour répéter avec lui cette expérience, mais l'analogie nous porte à la croire exacte. Néanmoins il était essentiel de l'effectuer.

» Lorsque la belle saison sera revenue, nous desirerions qu'il reprît ses expériences sur les radiations prismatiques, avec toutes les précautions qui peuvent leur donner la dernière rigueur; c'est-à-dire en fixant le trait de lumière solaire par un héliostat, en séparant ses éléments d'inégale réfrangibilité par les mêmes procédés dont Newton s'est servi dans l'analyse de la lumière, et en excluant avec le plus grand soin toute radiation étrangère à celles dont il voudra étudier les effets propres. Il sera utile qu'il répète alors une expérience que nous l'avons engagé à faire, et qu'il nous a dit avoir réussi, mais que le mauvais temps ne nous a pas permis de répéter nous-mêmes. Elle consiste à impressionner d'abord le papier sensible, non en l'exposant à la radiation solaire directe, ou diffuse, mais seulement en le plaçant, pendant quelques secondes, dans les portions les plus réfrangibles du rayon brisé, au-delà du violet visible, puis le reportant dans les parties les moins réfrangibles, pour voir si l'impression s'y continue encore, comme cela est très présumable, et comme il nous a dit l'avoir observé. Nous l'engageons aussi à faire alors les expériences nécessaires pour décider l'alternative d'interprétation dont ses résultats actuels sont susceptibles; laquelle consiste à savoir s'ils exigent nécessairement l'existence d'une propriété spéciale des rayons chimiques, dont les uns seraient à la fois *excitateurs* et *continuateurs*, tandis que les autres seraient seulement *continuateurs*, comme il l'a supposé; ou si, comme nous le croyons plus probable, la différence de ces effets successifs tiendrait seulement à un changement d'affection et d'impressionnabilité, résultant du changement de nature chimique ou moléculaire de la substance impressionnée. Parmi les épreuves qui pourraient décider cette alternative, nous desirerions qu'il examinât si la différente nature d'action qui semble ici inhérente aux réfrangibilités inégales, pourrait être suppléée par une différence d'intensité; et pareillement, si la différence d'affection ou d'impressionnabilité que l'on peut attribuer à la substance déjà impressionnée, comme

couséquence d'un changement chimique ou moléculaire, persiste et lui reste propre, tant qu'elle conserve son nouvel état.

» Ces mêmes expériences indiquent comme vraisemblables beaucoup d'autres conséquences qu'il faudra vérifier expérimentalement. Par exemple, quand on voit certaines combinaisons ou décompositions chimiques exiger d'abord l'action directe de la radiation solaire pour commencer à s'opérer, puis se continuer, et se terminer sous la seule action de la radiation diffuse, ne serait-ce pas aussi parce que les éléments en présence, étant une fois impressionnés, deviennent sensibles à ces dernières radiations, auxquelles ils étaient précédemment insensibles? Lorsque le chlorure d'or, et d'autres substances encore, une fois impressionnées par la radiation atmosphérique, continuent à se modifier dans l'obscurité, comme Seebeck dit l'avoir reconnu pour ce chlorure, ne serait-ce pas qu'elles deviendraient alors sensibles aux radiations qui émanent même des corps non lumineux? et ce dernier genre de radiation ne pourrait-il pas aussi être postérieurement efficace, dans une infinité de circonstances où l'on n'a pas jusqu'à présent soupçonné son action? Nous-mêmes, dans les expériences que le présent rapport a nécessitées, nous avons été surpris de voir les papiers bromurés s'impressionner sensiblement sur des parties de leur surface que nous nous étions efforcés de cacher à toute radiation directe, soit en les enfermant sous des enveloppes multiples de papier noir, collées les unes sur les autres, soit en les tenant serrées entre des plaques épaisses d'un bois très compacte. Est-ce que les particules d'air dont l'illumination compose l'éclat de l'atmosphère, ou les molécules pulvérulentes qui s'y trouvent mêlées accidentellement, s'imprégneraient de quelque propriété phosphorique qu'elles porteraient avec elles dans les endroits les plus cachés où elles peuvent s'introduire, et qui agirait ensuite par radiation? Ce sont là de simples soupçons que nous soumettons seulement à l'examen des expérimentateurs; car, dans une matière aussi nouvelle, il peut bien être permis d'indiquer toutes les déductions qui ne sont pas dépourvues de vraisemblance, à condition que ce soit dans le dessein d'appeler l'expérience à les vérifier.

» Nous signalons, avec plaisir, la variété de connaissances, ainsi que l'esprit d'invention, qui continuent de se faire remarquer dans ce nouveau travail de M. Edmond Becquerel. La jeunesse de l'auteur, et l'intérêt qu'il nous inspire, nous permettent de l'engager à fortifier ces belles qualités par la sévérité de raisonnement et la précision de mesures, qui assurent la durée des travaux scientifiques, et qui sont particulièrement essentielles

dans le sujet de recherches si riche, mais si difficilement saisissable, auquel il s'est livré. Nous nous réunissons pour demander à l'Académie de vouloir bien décider que le Mémoire dont nous venons de lui rendre compte sera inséré dans le *Recueil des Savants étrangers.* »

Les conclusions de ce Rapport sont adoptées.

NOMINATIONS.

L'Académie procède par voie de scrutin à la nomination d'un membre de la *Commission administrative* pour l'année 1841. Le membre sortant peut être réélu.

Le nombre des votants est de 38. Au premier tour de scrutin M. **Poinsot** réunit l'unanimité des suffrages.

MÉMOIRES LUS.

PHYSIQUE. — *Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres; par* M. **Poiseuille**. (Suite.)

(Commission précédemment nommée.)

IV. *Influence de la température sur la quantité de liquide qui traverse les tubes de très petits diamètres.*

« Nous avons établi, dans deux lectures que nous avons eu l'honneur de faire devant l'Académie, les 14 et 28 décembre dernier, l'influence de la pression, de la longueur du tube et de son diamètre, sur la dépense ou le produit; nous avons obtenu, pour l'équation qui lie ces diverses quantités, $Q = k'' . \frac{P.D^4}{L}$; on a trouvé le coefficient k'' égal à 183,78 pour la température de 10° cent., si P représente une pression d'eau distillée, ou bien égal à 2495,224 si la pression est exprimée en mercure à 10° centigradès. Nous allons maintenant chercher les variations qu'éprouve k'' suivant les températures.

» Nous avons agi depuis 0° jusqu'à 45° centigrades, et de cinq en cinq degrés. L'appareil est celui que nous avons employé jusqu'à présent; l'ampoule et le tube plongent dans un vase ou récipient contenant de l'eau distillée entretenue à la température à laquelle on veut faire l'expérience.

PHYSIQUE. — *Persistance de l'excitabilité spéciale, dans les papiers imprégnés de bromure d'argent qui ont été impressionnés instantanément; par* M. **Biot**.

« L'expérience qui fait l'objet de cette communication a été indiquée à la page 107 du dernier *Compte rendu*, dans une note annexée au Rapport lu à l'Académie sur le Mémoire de M. Edmond Becquerel.

» Le samedi, 16 courant, au soir, on s'est assuré que les deux papiers mentionnés dans cette note, et qui avaient été préparés le lundi précédent, 11, ne s'étaient nullement altérés. Le morceau qui avait été exposé à la radiation sous le verre rouge, avait conservé son empreinte pure : je le désignerai par A. Le morceau analogue, coupé dans la même feuille, et qui avait été seulement impressionné pendant un instant, puis abrité de toute radiation, n'offrait aucune trace d'image : je le désignerai par B.

» Ces deux morceaux ont été placés à côté l'un de l'autre, dans un même appareil d'exposition, et recouverts à distance par des verres rouges; savoir, B par le même verre sous lequel A avait continué à s'impressionner, et A sous un nouveau verre que l'on a lieu de croire moins perméable. Après les avoir ainsi abrités, on les a exposés simultanément à la radiation zénithale pendant toute la journée du dimanche 17, et la matinée du lundi 18. Voici quels ont été les résultats.

» Le papier A a continué de s'impressionner dans les seules parties qui avaient été primitivement exposées à la radiation directe. L'empreinte des parties vides de la vignette s'y est ainsi fortifiée d'une manière très notable. La spécialité de son excitabilité locale avait donc persisté.

» Il s'était formé sur ce papier une raie blanche, de forme irrégulière, qui traversait toute sa surface; elle avait fait disparaître les parties de l'empreinte primitive qui se trouvaient sur sa route. On a supposé que cet effet pouvait avoir été opéré par une précipitation intérieure d'eau, qui aurait résulté de l'abaissement de la température aux diverses époques de l'exposition.

» Le papier B avait éprouvé un effet pareil, mais plus considérable, qui avait aussi rendu une portion de sa surface, dépourvue d'empreinte. Mais en outre, soit par cette cause, soit par quelque autre qu'on ignore, il avait éprouvé une singulière modification. Tout le reste de sa surface s'était impressionné à travers ce même verre rouge, sous lequel, précédemment, A n'avait pas été impressionné; mais à la vérité un autre

jour, et peut être avec une qualité différente de la radiation. Néanmoins l'empreinte de la vignette se distinguait encore très bien par une teinte plus forte sur ce fond coloré; d'où il résulte que l'excitabilité spéciale avait persisté malgré cette perturbation.

» L'épreuve de cette persistance avait été indiquée comme essentielle par l'un des Commissaires, M. Arago, afin de savoir si l'aptitude acquise par le papier pour s'impressionner localement sous le verre rouge, ne résulterait pas d'un mouvement vibratoire, excité par la radiation dans les parties qu'elle avait frappées; mouvement qui pourrait se continuer sous le verre rouge pendant qu'il subsiste, mais qui ne pourrait pas y être excité, ou y renaître après s'être éteint, conséquemment après quelques jours de repos dans l'obscurité, à l'abri de toute radiation. Or l'impressionnabilité locale ayant persisté, un tel mouvement vibratoire paraît ne pouvoir pas être la cause du phénomène. »

RAPPORTS.

CHIMIE APPLIQUÉE. — *Rapport sur une Note de* M. DENY DE CURIS, *concernant un mode particulier de fabrication des mortiers.*

(Commissaires, MM. Poncelet, Piobert, Héricart de Thury rapporteur.)

« Le 24 août dernier M. Deny de Curis, ancien entrepreneur des travaux publics, a présenté à l'Académie une Note sur un mode de fabrication des mortiers hydrauliques de son invention, et deux fragments de mortiers qu'il a faits il y a vingt-neuf ans à Sèvres, avec de la chaux de Champigny. L'Académie a renvoyé la Note de M. Deny et ses mortiers à l'examen de MM. Poncelet, Piobert et Héricart de Thury, pour lui en faire un rapport.

» Déjà, en février 1835, une Commission, composée de MM. Girard, Navier, Robiquet et Héricart de Thury, fit à l'Académie un Rapport sur une Notice de M. Deny *sur les mortiers de construction à l'épreuve des filtrations, décompositions et altérations des eaux destructives et de l'humidité des lieux souterrains.* Dans ses conclusions, cette Commission disait que l'ouvrage de M. Deny était le travail d'un praticien, mais d'un praticien sage et éclairé, qui avait beaucoup observé, beaucoup fait par lui-même; que si parfois il différait de M. Vicat, il s'en excusait en homme consciencieux, en s'appuyant sur son expérience; qu'on voyait qu'il avait étudié

» Elle déclare qu'elle n'a rien à ajouter à cette réponse;

» Elle déclare en outre qu'elle n'a rien à modifier ni dans le fond, ni dans la forme, soit au texte, soit aux conclusions de son Rapport. »

M. MAGENDIE poursuit la lecture du Rapport sur les recherches de la Commission, dite *Commission de la gélatine*. Cette lecture sera continuée dans la prochaine séance.

MÉMOIRES PRÉSENTÉS.

PHYSIQUE. — *Mémoire sur le rayonnement chimique qui accompagne la lumière, et sur les effets électriques qui en résultent; par* M. EDMOND BECQUEREL. (Extrait par l'auteur.)

(Commissaires, MM. Biot, Arago.)

« Dans le Mémoire que j'ai l'honneur de présenter à l'Académie, j'ai eu pour but d'étudier les rayons chimiques qui accompagnent les rayons lumineux, à l'aide des effets électriques résultant des actions chimiques produites sous leur influence. Il y a plus de deux ans que j'ai montré que l'action des rayons chimiques troublant l'équilibre moléculaire des corps, il devait nécessairement en résulter un dégagement d'électricité facile à reconnaître à l'aide d'un galvanomètre et pouvant servir, par conséquent, à accuser la présence des rayons chimiques là où souvent les effets de coloration sont inappréciables. J'ai prouvé en même temps, qu'en étendant une couche très-mince de bromure ou de chlorure d'argent nouvellement précipité sur deux lames de platine ou d'or, placées horizontalement dans un vase rempli d'eau, et qui ne reçoit la lumière solaire que par la partie supérieure, si l'on éclaire une des lames seulement, il en résulte immédiatement un courant électrique accusé par un galvanomètre à fil long, très-sensible, en relation avec les deux lames. D'après la direction du courant, on reconnaît que la lame exposée au rayonnement prend l'électricité positive, conformément aux lois connues. Si, au lieu de bromure ou de chlorure d'argent étendu sur des lames de platine, on emploie des lames d'argent recouvertes de couches d'iodure ou de bromure d'argent, on obtient les mêmes effets électriques. C'est sur ce principe que j'ai construit l'appareil

suivant, que je nomme actinomètre électro-chimique (1), à l'aide duquel j'ai fait les expériences qui sont consignées dans mon Mémoire, et dont voici l'analyse.

» Cet appareil se compose d'abord d'une table longitudinale de 2 à 3 mètres de longueur, munie d'une règle divisée, le long de laquelle peut se mouvoir avec très-peu de frottement une planchette de bois carrée, supportant une cuve à eau.

» Cette cuve est cubique et de 1 décimètre de côté; dans son intérieur, rempli d'une solution étendue de sulfate de soude ou de toute autre solution conductrice de l'électricité, plongent deux lames d'argent de 25 centimètres carrés chacune, peu épaisses et attachées à deux montants en cuivre au moyen de fils d'argent; ce sont ces montants fixés sur la planchette, qui font communiquer les lames avec les deux extrémités du galvanomètre. En avant de la cuve à eau et sur la planchette, sont placés deux écrans : l'un en cuivre est percé d'une ouverture verticale et rectangulaire de 1 centimètre de largeur et ayant la hauteur de la cuve; cette ouverture correspond au milieu de celle-ci, de sorte qu'en éclairant l'écran, il n'y a que la portion de la lame d'argent immédiatement derrière l'ouverture qui soit éclairée et qui reçoive les effets du rayonnement.

» L'autre écran complétement opaque, peint en blanc, est placé vis à vis du précédent et immédiatement devant lui, lorsqu'on veut intercepter toute action du rayonnement et connaître la portion du spectre solaire qui frappe le centre de l'ouverture du premier écran.

» J'ai étudié dans le 1er paragraphe du Mémoire le spectre solaire produit par la réfraction d'un faisceau de rayons solaires à travers un prisme de flint-glass. Si l'on rend le spectre horizontal parallèle à la longueur de la table de l'actinomètre, et que la lame qui doit être exposée au rayonnement (lame que je suppose être recouverte d'iodure d'argent ainsi que l'autre) n'ait pas été impressionnée, en promenant cette lame du rouge au violet et même au-delà, on n'obtient sous l'influence des rayons les moins réfrangibles qu'une action très-faible; le courant ne commence à être sensible que dans le bleu, puis il acquiert son maximun dans l'indigo et va ensuite

(1) Le nom d'actinomètre, inventé par M. Herschel, a été employé par M. Pouillet pour désigner un appareil propre à mesurer la température zénithale. Je crois qu'en y ajoutant le mot électro-chimique, on désigne très-bien l'usage de cet appareil; car, d'après ce que nous verrons plus loin, il sert à comparer les effets des rayons chimiques au moyen des courants électriques développés sous leur influence.

en diminuant ; il faut toutefois arrêter le mouvement de l'appareil quand on observe la déviation de l'aiguille. Mais si l'on fait revenir la lame en sens inverse, une fois qu'elle pénètre dans les rayons les moins réfrangibles, on obtient une action assez forte dans le vert, le jaune, l'orangé et le rouge; dans ce cas, l'iodure étant impressionné, est affecté par les rayons continuateurs, à l'action desquels il était insensible auparavant.

» L'expérience prouve qu'à mesure que l'iodure est plus impressionné, l'action des rayons chimiques les moins réfrangibles ou continuateurs est plus intense. Cette augmentation va jusqu'à une certaine limite, de sorte que l'action maximum des rayons continuateurs ne dépasse guère l'action maximum des rayons excitateurs ou les plus réfrangibles.

» L'action de ces derniers au contraire est telle, que l'intensité du courant reste la même tant que l'iodure n'est pas trop impressionné.

» Si l'on a soin que dans chaque expérience la portion de la lame qui est derrière l'écran ne reste exposée, dans la partie du spectre que l'on explore, que le temps nécessaire à l'accomplissement de la déviation par première impulsion de l'aiguille aimantée du galvanomètre, l'iodure d'argent s'impressionne très-peu, et la même lame exposée un grand nombre de fois dans les mêmes conditions d'éclairement, donne sensiblement lieu à la même déviation. Ce fait est important à noter, car on peut faire avec la même lame plusieurs séries d'expériences comparables entre elles.

» J'ai trouvé ainsi, en prenant la moyenne de plusieurs expériences, qu'en représentant par 10 la longueur du spectre lumineux, les points maxima étaient placés aux distances suivantes :

LA LONGUEUR DU SPECTRE LUMINEUX ÉTANT REPRÉSENTÉE PAR 10.	MOYENNES de plusieurs expériences ; distance à l'extrême rouge.
Maximum des rayons continuateurs.....	2,32
Point intermédiaire où l'intensité du courant est un minimum.	5,12
Maximum des rayons excitateurs.....	8

Les maxima sont donc placés à peu près aux 0,2 des deux extrémités de la longueur du spectre lumineux, et le minimum à la moitié.

» Dans toutes les expériences que j'ai faites, les maxima ne changent pas de position, mais le rapport des intensités des rayons excitateurs et continuateurs varie dans chaque expérience. C'est pour ce motif que l'on ne peut donner un tableau des intensités du courant produit par l'action de tout le spectre; mais comme les rapports des intensités du courant produit par un même ordre de rayons sont proportionnels entre eux, on peut, au moyen des deux tableaux suivants, représenter les intensités du courant produit lors de l'action de ces deux espèces de rayons.

RAYONS CONTINUATEURS.			RAYONS EXCITATEURS.		
Parties du spectre lumineux.	Distance de la partie que l'on examine à l'extrême rouge, en représentant par 10 la longueur du spectre lumineux.	Rapport des intensités du courant, 20 étant l'intensité maximum.	Parties du spectre lumineux.	Distances à l'extrême rouge, 10 étant la longueur du spectre lumineux.	Rapport des intensités du courant, 20 étant l'intensité maximum.
Extrême rouge	0	1	Commencement du bleu.....	5,8	2,3
	0,6	3		6,47	5,5
	1,2	10		7,6	19,5
	1,8	18	Limite de l'indigo et du violet.	8	20 (maxim.)
Limite du jaune et du vert.....	2,3	20 (maxim.)			
	2,5	19			
	3,1	16	Extrême violet	10	9,8
Beau vert.	3,7	7	Rayons au-delà du violet.	12	
				13,2	
Commencement du bleu.....	5	2		14,4	
				15,6	
				16,8	

» On voit que l'action des rayons continuateurs ne s'étend pas au-delà du rouge tandis que celle des rayons excitateurs dépasse de beaucoup le violet.

» Dans le second paragraphe du Mémoire, j'ai comparé les effets produits par des spectres obtenus en réfractant un rayon solaire à travers différents prismes. Les spectres obtenus à l'aide des prismes de sel gemme et d'eau ont présenté la même position des maxima que dans les expériences précédentes, quoique les résultats absolus soient différents; tandis qu'avec le spectre obtenu à l'aide d'un prisme d'alun, que m'avait obligemment prêté M. Biot, les résultats se sont montrés un peu différents.

» Toutes ces expériences mettent en évidence le fait suivant: savoir,

qu'à l'extrême violet l'intensité du courant est moitié de l'intensité maximum produite par les rayons excitateurs.

» Dans le troisième paragraphe en comparant l'action du rayonnement chimique émané d'une flamme d'une lampe d'Argant avec les rayonnements qui accompagnent la lumière solaire et la lumière diffuse, on arrive aux résultats suivants, qui montrent que la flamme de la lampe émet beaucoup plus de rayons continuateurs que de rayons excitateurs. Ainsi avec les écrans, de verre coloré on a obtenu :

	RAPPORTS DES INTENSITÉS DU COURANT PRODUIT PAR L'ACTION		
	du rayonnement solaire.	du rayonnement qui accompagne la lumière diffuse.	du rayonnement d'une lampe d'Argant.
Sans écran.....	100	100	100
Verre bleu.....	27,1	23,3	20
Verre jaune clair.....	8	4,2	46,6
Verre rouge presque pur..	1,11	»	1,16
Verre vert foncé.....	0,14	»	1,6

» Dans ce même paragraphe j'ai commencé à étudier l'action des écrans sur les rayons chimiques d'inégale réfrangibilité et à comparer les intensités du courant électrique produit lors de l'action des rayons chimiques d'intensité différente; je n'ai encore obtenu aucune loi. Lorsque la saison le permettra, je compte répéter les expériences entre de plus grandes limites, afin de construire une courbe des intensités du courant d'après les intensités des rayons chimiques qui influencent l'iodure d'argent. Je compte en outre, à l'aide de l'actinomètre électro-chimique, dont la sensibilité est très-grande, étudier la polarisation des rayons chimiques, comparer les intensités des rayons réfléchis par différentes surfaces, et enfin faire une foule de recherches sur ce rayonnement qui ne peuvent être tentées que par ce nouveau mode d'expérimentation. »

ment. Quelle que soit la dose à laquelle on l'ait donné, il n'a jamais causé la moindre action nuisible. Plusieurs fois il a été pris à la dose de 2 gros (représentant 9 à 10 gros de seigle ergoté), dans des cas de métrorragies foudroyantes, suites d'avortements ou autres, et qui cédaient immédiatement ou presque immédiatement à l'action de ce remède. J'ai appelé ce produit *extrait hémostatique*.

» L'huile ergotée agit absolument sur les animaux comme l'ergot lui-même, et à des doses correspondantes à ce dernier, seulement ses effets sont plus prompts; ils sont immédiats chez les sujets faibles, tels que oiseaux, poulets, que l'on endort facilement avec un gros de ce principe, équivalant à un peu moins de 3 gros de poudre d'ergot. Ces animaux succombent ensuite dans les vingt-quatre heures, sans être presque sortis de l'état de stupeur où ce poison les a plongés. A la dose de 5 gros, j'ai obtenu chez un chien tous les phénomènes de l'ergotisme convulsif, tels que paralysie complète du train postérieur, attaques convulsives violentes, etc. Pour obtenir cette huile avec toutes ses propriétés énergiques, il faut nécessairement l'extraire par l'éther froid, et éviter, dans cette opération, toute action de la chaleur. Enfin, ce principe peut encore se trouver tout à fait inerte, s'il a été obtenu d'ergots non parvenus à leur maturité. L'huile est donc le poison, et l'extrait aqueux le remède du seigle ergoté, quoi qu'en ait dit M. le docteur Wright (*Journal de Pharmacie*, juillet 1841), qui pense au contraire que l'huile est le principe qui arrête les hémorragies, ce qui se trouve contredit par plus de cinquante observations médicales, faites à mon instigation par des médecins éclairés de cette ville, et dans lesquelles mon extrait hémostatique ne s'est jamais démenti une seule fois dans sa puissante action anti-hémorragique. »

OPTIQUE. — *Mémoire sur la constitution du spectre solaire; par* M. EDMOND BECQUEREL. (Extrait par l'auteur.)

(Commissaires, MM. Biot, Arago, Babinet.)

« Je crois avoir résolu dans ce Mémoire plusieurs questions relatives à l'action des rayons chimiques et phosphorogéniques sur les substances qu'ils impressionnent. Ce travail est divisé en quatre parties :

» La première comprend les notions connues sur la constitution du spectre lumineux et quelques développements sur les raies qui traversent le spectre.

» Dans la deuxième partie, j'ai montré que pour tous les spectres chimiques résultant de la réaction des rayons solaires sur les différentes substances impressionnables, les raies sont les mêmes que celles du spectre lumineux, pourvu que l'on ne considère que les rayons de même réfrangibilité. On appelle spectre chimique l'ensemble des rayons qui agissent sur une substance sensible donnée. Généralement les spectres chimiques s'étendent au delà de l'extrême violet jusqu'à une distance qui est quelquefois égale à la moitié de la longueur du spectre lumineux; il s'ensuit qu'il se trouve au delà des rayons lumineux une infinité de raies nouvelles qui font suite à celles que Fraunhofer avait observées. Je les ai dessinées avec soin sur une planche que je présente en même temps à l'Académie.

» Dans la troisième partie, est exposée l'action des rayons solaires sur les corps qui deviennent lumineux sous leur influence, c'est-à-dire sur les corps phosphorescents par insolation. On a reconnu que les spectres phosphorescents possédaient les mêmes raies que les spectres chimiques et lumineux. Les substances qui ont été employées dans ces expériences sont les sulfures de calcium et de barium (c'est-à-dire les phosphores de Canton et de Bologne), regardés comme étant les plus impressionnables. En constatant les effets, j'ai été conduit à la découverte d'autres rayons qui agissent sur ces substances uniquement pour détruire la phosphorescence produite. Si l'on fait agir par exemple le spectre solaire sur le sulfure de calcium, on observe un spectre phosphorogénique ayant deux maxima d'action, l'un vers l'extrême violet, l'autre au delà; l'action s'arrête dans les rayons les moins réfrangibles vers la raie G; mais, à partir de cette raie, c'est-à-dire de la limite du bleu et de l'indigo jusque bien au delà du rouge, il se trouve un spectre de rayons dont l'effet est de détruire complétement la phosphorescence produite par l'action des autres rayons, et même d'empêcher ce sulfure d'être phosphorescent par la chaleur.

» Le sulfure de barium soumis aux mêmes recherches, présente les mêmes résultats, si ce n'est que le spectre des rayons phosphorogéniques n'a qu'un maximum d'action situé au delà de l'extrémité violette.

» Ces faits montrent donc que des rayons situés au delà des rayons visibles, c'est-à-dire des rayons obscurs, produisent de la lumière, puisque ces sulfures deviennent phosphorescents sous leur influence, et qu'ensuite, en faisant tomber sur eux des rayons lumineux, rouges, orangés, jaunes, verts, bleus, on détruit cette faculté et ces corps redeviennent obscurs.

» Enfin la quatrième partie de ce travail renferme quelques idées théoriques touchant l'action des rayons solaires sur les corps.

» Je n'ai pas encore résolu complétement la question relative à la chaleur rayonnante et à la détermination des raies du spectre calorifique; mais je m'en occupe actuellement, et j'espère pouvoir publier incessamment tous les résultats auxquels ces recherches m'auront conduit. »

En présentant le travail dont on vient de lire l'analyse, M. ARAGO rappelle qu'à l'époque où, de divers côtés, on attaquait la découverte de M. Daguerre, il signala les expériences que M. Becquerel vient de faire, avec tant de succès, sur l'existence des stries dans le spectre chimique, comme une des applications auxquelles les nouveaux réactifs se prêteraient parfaitement. M. Arago indique aussi diverses modifications importantes, que les expériences déjà faites pourraient recevoir dans l'intérêt des théories de la lumière.

Le secrétaire s'est cru également obligé, pour rendre hommage à la vérité, de réclamer en faveur de M. *Seebeck*, de Berlin, la découverte de la propriété singulière dont certains rayons lumineux sont doués, *d'éteindre* la lumière phosphorique des corps. Voici le passage dans lequel le physicien allemand consigna ses observations :

« *Le rouge jaunâtre tue les phosphores de Marggraff et de Canton; le bleu les ranime* (1).

» Les phosphores de baryte, préparés d'après la méthode connue de Marggraff, luisent d'un *rouge jaunâtre*; les phosphores de sulfate de strontiane répandent une lumière *verte* (vert de mer), quelquefois *bleue*; les phosphores de Canton (sulfures de chaux, coquilles d'huîtres) luisent en *rouge des roses* ou en *violet* très-pâle.

» En les exposant aux couleurs prismatiques, les phosphores luisaient fortement dans le bleu et le violet; ils devinrent même lumineux au delà du violet, où à peine on voyait encore de la couleur. Ils s'affaiblirent dans le vert, plus encore dans le jaune : ils devinrent le plus faibles dans le rouge. Lorsque l'ouverture par laquelle passait la lumière était rétrécie de 6 lignes à 2, les phosphores devinrent luisants dans le *bleu* et le *violet*, mais aucunement dans le *rouge*.

» Je plaçai dans l'ouverture un verre *bleu* foncé si épais, qu'à peine on distinguait encore à travers des objets fortement éclairés. Le soleil donnant par l'ouverture, le phosphore de Bologne devint de suite lumineux, répan-

(1) GOETHE; *Farbenlehre*, t. II, p. 703.

dant comme d'ordinaire une lueur rougeâtre. Je remplaçai le verre bleu par un verre *rouge jaunâtre* si peu épais, qu'on reconnaissait à travers les objets très-facilement. Aucun de mes phosphores ne devint lumineux, quoiqu'on les exposât très-longtemps à la lumière rouge jaunâtre.

» Un phosphore fut rendu luisant à la pure lumière du soleil. On observa le temps dans lequel il s'éteignait de lui-même : c'était 10 minutes. Je le rendis de nouveau luisant au soleil, et je le plaçai rapidement dans la lumière qui traversait un verre rouge jaunâtre. Ce phosphore s'éteignit entièrement et dans un temps plus court qu'à l'obscurité. Après une ou deux minutes on ne voyait aucune lueur. Plus le ciel était pur, et plus le verre rouge jaunâtre éteignait avec force.

» Je confirmai ces contrastes entre le bleu et le rouge par les expériences suivantes : je plaçai une lentille de 4 pouces dans la lumière qui avait traversé un verre rouge jaunâtre. Le phosphore placé au foyer (c'était un phosphore qui répandait la plus vive lumière) fut éteint sur-le-champ; c'était comme un charbon jeté dans l'eau; il n'était pas même nécessaire que le phosphore fût entièrement au foyer de la lentille. On substitua au verre rouge jaunâtre, un verre bleu très-épais. Des phosphores terreux qui ne luisaient pas furent placés au foyer; ils devinrent sur-le-champ aussi lumineux qu'ils le deviennent au soleil sans interposition de verre. »

CHIMIE. — *Recherches sur l'acide nitrique; par* M. E. MILLON. (Extrait.)

(Commissaires, MM. Dumas, Pelouze, Regnault.)

« La purification ordinaire de l'acide nitrique consiste principalement à en séparer les acides hydrochlorique et sulfurique. Mais les procédés qu'on emploie n'en séparent point l'acide nitreux. Cet acide y existe cependant, lors même que l'acide est très-dilué et tout à fait incolore. Pour montrer l'influence de cette portion nitreuse, je dirai qu'il suffit que l'acide le plus affaibli en contienne des traces pour qu'il précipite l'iode des iodures, le soufre des monosulfures; pour qu'il colore les protosels de fer en brun et le cyanoferrure de potassium en vert; tandis que le même acide, s'il est parfaitement pur, décompose les monosulfures sans les troubler, ne déplace point l'iode de sa combinaison avec les métaux alcalins et ne colore ni les protosels de fer, ni le cyanoferrure de potassium.

» J'ajoute encore que le bleu d'indigo qui est décoloré par l'acide nitri-