

JEAN-CLAUDE BOUDENOT

# Comment **BRANLY**

## a découvert la radio

Un siècle de  
télécommunications

*Préface d'Étienne Guyon*



# Comment Branly a découvert la radio

Jean-Claude BOUDENOT

Préface d'Étienne GUYON



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

Publié avec le concours du Centre national du livre.

ISBN : 2-86883-839-1

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

© EDP Sciences 2005

# Préface

---

L'ouvrage de Jean-Claude Boudenot est une contribution à la vie et à l'œuvre de Édouard Branly. Elle s'inscrit dans tout un ensemble de publications faites en 2005 dans le cadre des manifestations de l'Année Mondiale de la Physique. Jean-Claude Boudenot a été, lui-même, un important contributeur de cet anniversaire de l'« annus mirabilis » qui vit Albert Einstein publier des articles qui marqueront la science du XX<sup>e</sup> siècle : sur l'effet photoélectrique et le photon, sur le mouvement brownien et sur la relativité restreinte. Jean-Claude Boudenot nous a tracé de façon très vivante les portraits des trois protagonistes principaux de cette dernière révolution scientifique à travers des biographies scientifiques de Lorentz, de Poincaré et d'Einstein lui-même. Se justifiait-il d'écrire, à la suite de la vie de ces génies, une nouvelle biographie de Branly ? Non, me semble-t-il, si il s'était agi seulement de raconter une nouvelle fois la vie et l'œuvre de Branly qui se trouve déjà présentée dans l'excellent ouvrage récent de Philippe Monod-Broca *Branly au temps des ondes et des limailles* (paru chez Belin en 1999). Mais on doit comprendre le projet de J.-C. Boudenot à travers l'ensemble des chapitres qui font suite au premier, consacré à la vie de Branly. Plus que de seulement mettre en perspective l'œuvre de Branly, ces chapitres présentent, de façon très vivante, un panorama de la science et des techniques du XIX<sup>e</sup> siècle – le siècle des ondes – marqué par la gigantesque contribution fondamentale de J.-C. Maxwell, mais aussi par toutes les applications qui vont faire que, progressivement, le monde va devenir un village pour les communications. Nous trouvons dans ces chapitres de façon détaillée et pédagogique (J.-C. Boudenot

n'oublie pas son rôle d'enseignant à l'Institut Catholique) l'histoire des ondes électromagnétiques. Nous y resituons la place qu'occupent de nombreux savants qui ont contribué aux découvertes fondamentales mais aussi qui ont pensé applications. En ce sens, ce nouveau travail d'historien des sciences et des techniques se situe bien dans l'esprit des projets de l'Année Mondiale de la Physique. C'est ce grand mouvement des sciences et des techniques qui nous permet de comprendre l'impact considérable qu'a eu la découverte de la « radioconduction » d'un ensemble de grains conducteurs soumis à un rayonnement électromagnétique (au départ une simple décharge électrique) et, par suite, la renommée qu'a connu Édouard Branly, et ce jusqu'à des funérailles nationales en 1940. Si l'importance de ces découvertes fut considérable à l'époque de sa découverte et de ses premières utilisations pour les radiotélécommunications jusqu'à la découverte de la lampe triode par Lee de Forest, l'effet Branly reste aujourd'hui incomplètement compris et reste l'objet de recherches actives. Ah ! J'allais l'oublier ! L'année mondiale 2005 est aussi un peu celle d'un centenaire de Édouard Branly puisque 1905 marque la première présentation publique d'expériences de Branly de télémechanique, ancêtre de la télécommande. Cet autre témoignage nous éclaire lui aussi sur ce savant qui sût, plus que de nombreux autres, aller jusqu'au bout vers les applications de la science. Nul doute, comme le propose J.-C. Boudenot, que Édouard Branly, physicien et médecin, eut apprécié les contributions actuelles de la physique et des ondes à la médecine !

Étienne Guyon

# Sommaire

---

Préface .....	III
Introduction .....	1
<b>1 – Branly, une vie .....</b>	<b>7</b>
Enfance et jeunesse .....	7
Les années d'études à l'École Normale Supérieure .....	9
La Sorbonne .....	13
Professeur à l'Institut Catholique .....	17
Médecine et mariage .....	20
La découverte du 24 novembre 1890 .....	27
Une double vocation .....	32
Paris émerveillé .....	35
Le prix Nobel... de Marconi et Braun .....	40
L'Académie : Édouard Branly ou Marie Curie .....	41
Un nouveau laboratoire .....	45
Dernières années .....	49
<b>2 – La science au XIX<sup>e</sup> siècle .....</b>	<b>55</b>
La mécanique, science fondatrice .....	55
L'électricité, des origines à Édouard Branly .....	57
L'optique, des origines à Édouard Branly .....	71
L'électricité et les expositions universelles .....	80
Les débuts de l'industrie électrique .....	89
<b>3 – La découverte .....</b>	<b>95</b>
La conduction de l'électricité .....	95
Découverte des ondes hertziennes et de l'effet photoélectrique .....	98
La découverte de la radioconduction .....	110
Vers la notion d'électron .....	114
Interprétation de l'effet Branly .....	118

<b>4 – Le développement de la TSF .....</b>	<b>123</b>
Des premiers télégraphes aux sémaphores de Chappe .....	123
Le télégraphe électrique de Morse .....	127
Branly, Popoff et Marconi .....	132
Première liaison TSF transmanche et les débuts français de la TSF .....	137
12 décembre 1901, la première liaison TSF transatlantique .....	139
De la TSF à la radio .....	143
Naissance de la télévision .....	148
<b>5 – Les ondes électromagnétiques aux XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècles : une large gamme d'utilisation .....</b>	<b>157</b>
Les différentes bandes radio .....	157
Les différentes bandes radar .....	168
Utilisation des ondes électromagnétiques en radioastronomie .....	173
Les ondes THz .....	175
Les ondes optiques .....	178
Les ondes « particulières » .....	183
Conclusion .....	185
<b>Liste des noms cités .....</b>	<b>187</b>
<b>Bibliographie succincte .....</b>	<b>191</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>193</b>

# Introduction

---

En cette année mondiale de la physique, il est largement question des découvertes d'Einstein et de son année miraculeuse de 1905. Par un heureux hasard de circonstance, alors que le 30 juin 1905 est la date officielle de la naissance de la relativité restreinte (jour où l'article d'Einstein est reçu par son éditeur, les *Annalen der Physik*), Édouard Branly présente au Trocadéro, également le 30 juin 1905, ses célèbres expériences de télémechanique devant plus de cinq mille personnes émerveillées. En dehors de cette étrange coïncidence calendaire, il y a entre ces deux savants, au moins deux autres points communs. Le premier est la télégraphie. Tandis que Branly est à l'origine de la télégraphie sans fil, c'est le problème de la synchronisation des horloges par télégraphie qui conduira Einstein à remettre en cause la notion bien établie de temps absolu<sup>1</sup>. Le second point commun est l'effet photoélectrique. C'est en étudiant certaines particularités de cet effet que Branly va découvrir, le 24 novembre 1890, le phénomène de la radioconduction, tandis que c'est Einstein qui interprétera, le 17 mars 1905, l'effet photoélectrique, mettant ainsi fin à l'une des énigmes les plus délicates de la physique. Dans le cadre de cette année mondiale de la physique, il nous a semblé judicieux de mieux faire connaître les circonstances de la découverte de Branly, qui donnera ensuite lieu au développement considérable de la TSF puis de la radio.

---

<sup>1</sup> Sur ce point nous conseillons la lecture du très bon ouvrage de Peter Galison : *L'empire du temps, les horloges d'Einstein et les cartes de Poincaré*, Éd. Robert Laffont.

Au premier chapitre, nous découvrirons la vie longue et bien remplie de Branly. Ses parents, d'origine modeste, lui inculquent le goût du travail et de la réflexion. « *Désiré Eugène Édouard Branly est né à Amiens le 23 octobre 1844. Fils d'un professeur au lycée de Saint-Quentin, il fut d'abord reçu bachelier ès lettres, puis bachelier ès sciences. Puis...* », lit-on dans son autobiographie. Il ne parle ni de son enfance, ni de son entourage familial. Seules, les études, semblent compter pour lui. Elles sont brillantes, il « rafle » les premiers prix, entre à l'École Normale Supérieure, fait sa thèse à la Sorbonne, est nommé directeur adjoint d'un laboratoire de cette prestigieuse université et d'un coup, à trente ans, il décide d'une nouvelle trajectoire, plus périlleuse, et entre à l'Institut catholique de Paris qui vient d'être créée. Sa nouvelle position étant fragile, il décide de faire des études de médecine. À la fois étudiant, professeur et chercheur, Branly est un travailleur infatigable. Il doit se contenter d'un ancien dortoir, transformé en laboratoire, pour faire ses recherches. C'est en étudiant la conduction électrique qu'il va faire sa grande découverte, en novembre 1890 : la radioconduction. Cette découverte est riche d'applications mais notre savant préfère étudier, par des expériences aussi nombreuses que variées, les origines de ce phénomène curieux. Branly est à ce moment connu de ses confrères mais pas encore du public. Une recherche, débutée en 1898, va changer les choses. Branly s'intéresse à la télémechanique, l'ancêtre de la télécommande, et perfectionne son dispositif au point de la présenter au Trocadéro, en 1905, devant le tout-Paris. Il mène alors de front la recherche et ses consultations médicales. En 1911, il est élu, au terme d'une joute médiatique qui lui échappe, à l'Académie des sciences devant Marie Curie. Branly est consacré mais il n'a toujours pas de laboratoire ! Ce n'est qu'au début des années 1930, grâce à la générosité du public et d'un grand donateur, François Coty, que Branly va enfin bénéficier d'un laboratoire digne de ce nom. Son inauguration a lieu l'année de ses quatre-vingt huit ans. Il ne pourra malheureusement pas en profiter très longtemps. En 1939, éclate la troisième guerre que Branly ait vécue. Il doit s'éloigner de Paris. À son retour, en 1940, sa santé décline et il s'éteint le jour de Pâques.

Le nom d'Édouard Branly est lié à la science de l'électricité. Nous présentons, dans le second chapitre, l'évolution de cette science afin de bien situer le contexte de la découverte de notre savant. L'année 1800 marque une transition dans cette science car elle correspond à l'invention de la pile. Avant la pile, on ne sait pas créer un courant. Les physiciens des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles doivent se contenter d'expériences d'électrostatique qui sont d'ailleurs à l'honneur dans les salons de physique. L'apparition de la pile va changer la donne. Oersted s'aperçoit, en 1819, de l'action d'un courant sur un aimant et Ampère en propose la théorie : il fonde presque à lui seul, un nouveau

domaine, l'électrodynamique. Les notions de courant, de potentiel et de résistance, si familières de nos jours, sont extrêmement modernes lorsque Branly est étudiant. À cette époque, la loi d'Ohm n'est pas encore enseignée à Polytechnique et, en 1873, Branly signera la première thèse faite en France sur le potentiel électrique. L'optique joue également un rôle dans les premières recherches de Branly. Son maître à la Sorbonne, Paul Desains, est un spécialiste des rayonnements caloriques, aujourd'hui appelés infrarouges. Lorsque Branly fait ses études, le débat sur la nature de la lumière, onde ou corpuscule, est définitivement tranché. La lumière est bien une onde, l'expérience cruciale de l'optique, réalisée en 1850 par Foucault, a dissipé les derniers doutes. On est loin d'imaginer que ce débat, vieux de deux siècles, ne va pas tarder à réapparaître. Les rayonnements infrarouge et ultraviolet ont été découverts au même moment que la pile, mais leur détection n'est pas aisée. La spectroscopie apparaît lorsque Branly est encore en classe préparatoire, elle jouera un rôle clef dans sa thèse de médecine. La jeunesse de Branly coïncide avec le développement de la seconde révolution industrielle. Les expositions universelles, dont la première a lieu à Londres en 1851, connaissent un succès grandissant. La technique est à l'honneur, on peut y mesurer les progrès extraordinaires réalisés par la « fée électricité ». Nous aborderons ces expositions grandioses qui permettent à un très large public, de découvrir les dernières inventions.

Notre troisième chapitre est consacré à la découverte majeure de Branly : la radioconduction. La relation entre courant et potentiel, c'est-à-dire la notion de résistance électrique est, au moment où Branly fait ses premières recherches, un domaine qui reste largement à défricher. Il n'est donc pas étonnant de voir notre physicien s'intéresser à la conduction électrique. En 1890, le courant est encore un fluide mystérieux, la notion d'électron ne sera dégagée que plus tard, à partir des années 1896-1897. Maxwell vient de donner, dans une formidable synthèse, une vue d'ensemble de l'électrodynamique : on assiste à la naissance de l'électromagnétisme. Mais la synthèse de Maxwell est difficile d'accès tant d'un point de vue mathématiques (on n'utilise pas encore la notion de vecteur en physique) que physique (l'éther aux propriétés mécaniques surprenantes y joue un rôle aussi essentiel que déconcertant). Ce sont les « maxwelliens », physiciens contemporains de Branly, qui feront connaître l'œuvre du maître. Ils s'appellent FitzGerald, Heaviside, Larmor, Hertz, Lorentz, Poincaré... Ce n'est qu'en 1888, que Hertz démontre expérimentalement l'existence des ondes électromagnétiques. Nous aborderons les difficultés de cette mise en évidence et la ténacité de Hertz dans ce travail. Mais curieusement, ces ondes « hertziennes », qui sont la meilleure preuve de la validité de la théorie de Maxwell, sont découvertes en même

temps, et par le même homme, qu'un phénomène qui en montrera les limites ! Hertz découvre l'effet photoélectrique dont l'interprétation, quantique, sera donnée près de trente ans plus tard par Albert Einstein. Il appartiendra à Branly la gloire de détecter les ondes électromagnétiques de Hertz par un phénomène cousin de l'effet photoélectrique. Nous montrerons le cheminement qui a mené Édouard Branly de ses recherches sur la conduction électrique à la découverte de la radioconduction qui allait ouvrir les portes, immenses, des télécommunications.

Les hommes ont, de tous temps, voulu communiquer rapidement sur de grandes distances. Les grecs, comme les romains, utilisent des signaux visuels. Ainsi, César peut communiquer avec l'ensemble de ses armées jusqu'aux extrémités de son Empire. Le système de communication des indiens d'Amérique est également bien connu. Nous retracerons, dans le chapitre 4, l'évolution des systèmes de communication. La France, avec le télégraphe de Chappe, fait figure de pionnière. Mais l'utilisation de signaux optiques présente l'inconvénient d'être dépendante des conditions météorologiques. Le courant électrique peut sans doute contourner cet obstacle. Ampère pose, l'un des tout premiers, le principe d'un télégraphe électrique. Les anglais, avec le télégraphe de Wheatstone, sont les premiers à le déployer sur une grande échelle. Le peintre Samuel Morse invente un système plus simple ainsi qu'un alphabet parfaitement adapté. Grâce à lui, la télégraphie électrique va se développer rapidement. En 1851, l'Angleterre est reliée à la France. En 1866, le vieux continent est relié au nouveau continent et en 1873, il y a deux millions de kilomètres de lignes télégraphiques dans le monde ! Au moment de la découverte de Branly, en novembre 1890, la télégraphie filaire est prospère. En comparaison, que représente la transmission, sans fils, d'un signal rudimentaire sur une vingtaine de mètres ? En vérité, cette application potentielle ne fait pas partie des priorités de Branly. Ce qu'il cherche, c'est comprendre l'origine de cet étrange phénomène qu'est la radioconduction. Le physicien russe Popoff fait la démonstration, en 1895, d'une transmission sans fil, ce qui lui vaudra d'être considéré dans son pays comme le père de la radio. Cette même année, un tout jeune homme italien, fait des essais de TSF dans la villa de ses parents. Il s'agit de Marconi, il n'est pas seulement animé d'une curiosité scientifique exceptionnelle, il a aussi le goût d'entreprendre. Il surmonte les obstacles, multiplie les démonstrations et les records, « médiatise » ses succès techniques. Tant et si bien, que malgré le très grand scepticisme des physiciens de l'époque, il réussit un exploit inimaginable : la transmission sans fil d'un signal à travers l'Atlantique. Nous sommes en décembre 1901, un peu plus de dix ans seulement après les premiers essais de Branly entre les pièces de son laboratoire. Rien ne peut alors arrêter l'italien. Il s'assure un véritable monopole,

ses brevets sont difficilement contournables. Jusqu'en 1906 environ, le détecteur de Branly – son cohéreur comme l'appelle Lodge – est en œuvre dans la majorité des systèmes utilisés. Le tout premier radar, qui date de 1904, en fait également usage. Puis les lampes triodes, baptisées lampes audion car elles permettent de transmettre le son et pas seulement le code Morse, sont utilisées. La TSF se transforme petit à petit en radio. Nous découvrirons également dans le chapitre 4, les principales étapes de l'évolution de la radio. Transmettre le son c'est bien, mais pourquoi ne pas transmettre également l'image ? La télévision fait son apparition dans les années trente. Bien que les jeux olympiques de Berlin (1936) soient télévisés en direct, ce n'est véritablement qu'après la seconde guerre mondiale que la télévision prendra son essor. Nous en verrons également les principales étapes.

Et maintenant, en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, où en sommes-nous ? Pour répondre à cette question, nous avons adopté, dans le cinquième et dernier chapitre, un autre point de vue. Nous explorons le « spectre électromagnétique », c'est-à-dire le domaine des ondes électromagnétiques, que nous classons ici par fréquence croissante. Nous commençons avec les ondes « extrêmement basse fréquence », qui ont des longueurs d'onde associées pouvant atteindre 10 000 km ! Elles sont utilisées principalement, pour les communications sous-marines. Puis viennent les ondes « ultra basse fréquence », puis « très basse fréquence » qui sont utilisées par exemple, dans le domaine des communications maritimes ou de la distribution de signaux temporels. Le domaine des ondes « basse fréquence » nous fait entrer dans celui de la radio « grandes ondes ». Les ondes de « moyenne fréquence », ou « ondes moyennes », figurent encore sur les anciens postes radio, tandis que les ondes « haute fréquence » sont presque synonymes « d'ondes courtes », très prisées des radioamateurs. Toujours plus haut en fréquence, on trouve les « très hautes fréquences » exploitées par la télévision, les radios FM et par la radio numérique, ainsi que les « ultra haute fréquence » utilisées par la télévision, la téléphonie mobile ou par les systèmes de navigation de type GPS. Le spectre n'étant pas épuisé, il faut avoir recours à d'autres qualificatifs : les « super hautes fréquences » et les « extrêmement hautes fréquences » dont les applications ne manquent pas, depuis l'identification automatique de véhicules aux systèmes d'atterrissage par tout temps. Les radaristes préfèrent décliner les lettres de l'alphabet. Ainsi, déclinons-nous les bandes L, S, C, X ou K ! Là encore, les applications sont aussi nombreuses qu'importantes allant de la gestion du trafic aérien aux radars anti-collision des voitures. Un petit saut en radioastronomie nous assurera la liaison avec une autre partie du spectre des ondes électromagnétiques, celle qui correspond à ce que l'on désigne classiquement par « l'optique ». L'usage veut que le classement soit fait en longueur d'onde. Nous continuerons donc notre

exploration en plongeant vers des longueurs d'onde de plus en plus faibles : infrarouge, visible, ultraviolet. Là, se rejoignent deux parties de la physique que Branly a explorées. Nul doute que notre savant aujourd'hui se passionnerait pour les ondes dites « Téraherz » (THz), situées à la frontière entre l'électromagnétisme et l'optique et dont les utilisations potentielles se retrouvent aussi bien dans la communication, dans le médical que dans la sécurité. Nous terminerons notre « voyage spectral » avec des ondes qui ressemblent de plus en plus à des particules : les rayons X et les rayons gamma. Le chemin parcouru depuis Branly est immense et ce qui reste à parcourir est, heureusement, encore plus vaste. Il reste que la radioconduction est toujours partiellement une énigme et que les recherches initiées par notre savant, sont encore actives.

# 1

## Branly, une vie

---

### Enfance et jeunesse

---

Édouard Branly naît le 23 octobre 1844 à Amiens, à une époque où la France est encore une royauté, celle de Louis Philippe. Son père, Édouard Joseph, est depuis un an maître d'études au collège de cette ville. Sa mère, née Elisa Gillion, est comme son mari, originaire de cette région d'Artois. Dès le mois de mars de l'année suivante, le couple s'installe à Saint-Quentin où Édouard Joseph est nommé professeur de 7<sup>e</sup> au collège des Bons Enfants, qui deviendra en 1853 le lycée impérial de la ville. En 1851 naît un second fils, Edgar. Les deux enfants sont élevés dans le culte du travail, des disciplines intellectuelles et des vertus chrétiennes. Étienne Branly, le fils de notre physicien, nous dépeint les traits de caractère dont Édouard a hérité de sa mère. Il cite « *le caractère renfermé, la ténacité dans l'effort, l'économie, le manque de sociabilité, la méfiance, l'esprit d'observation, le peu d'aspiration à exprimer un sentiment en public et le peu de curiosité intellectuelle pour tout ce qui ne se rattachait pas à la vie qu'il avait choisie* ». De même, il raconte qu'Édouard a hérité de son père du « *tempérament sanguin sans la jovialité, de l'esprit autoritaire, de la prédisposition à la colère subite, à l'entêtement, voire à l'obstination.* » La rigueur et le sens du travail qui règnent dans cette famille, ajoutés aux prédispositions probables du jeune Édouard pour les études, en font un élève brillant. Il décroche pratiquement tous les premiers prix durant sa scolarité. Sa seule faiblesse, toute relative, est au grand dam de son père, le thème grec où il n'arrive qu'en deuxième ou troisième place ! Une anecdote illustre



Les parents d'Édouard Branly : Édouard Joseph Branly et Elisa Branly, née Gillion.





Le frère d'Édouard  
Branly, Edgar.

bien l'austérité familiale : Édouard Branly réussit son baccalauréat en totalisant un nombre de points jamais égalé, le jury décide alors de rembourser les droits d'examen et le recteur lui remet un louis d'or. Édouard revient à la maison, montre fièrement la pièce à son père, qui décide de la lui conserver. Branly se souviendra plus tard : « *J'avais parié que papa serait heureux et le montrerait et que maman le serait aussi mais le cacherait pour me prémunir contre l'orgueil. J'ai gagné mon pari car il y a dans la réponse de maman une page entière consacrée à ce péché* ».

Nous sommes en 1860. À l'issue de la classe de rhétorique (1859-1860), notre futur physicien, qui n'a alors que seize ans, obtient son bac ès lettres. Édouard Branly, qui souhaite s'orienter vers les sciences, décide de préparer son bac ès sciences. Il le passe devant la faculté des sciences de Paris et l'obtient en 1861. Puis il suit son année scolaire 1861-1862 au lycée de Saint-Quentin, mais à la rentrée d'octobre 1862, son père Édouard Joseph l'envoie à Paris, au lycée Napoléon (l'actuel lycée Henri IV) suivre le cours de mathématiques spéciales. Le professeur de physique de ce lycée renommé n'est autre qu'Édouard Desains, originaire de Saint-Quentin et ami d'Édouard Joseph Branly. L'atmosphère élitiste de ce grand lycée parisien n'est pas sans déplaire au jeune Édouard : « *Il n'y a pas d'élève véritablement faible dans ma classe, écrit-il à un ami, le travail est différent de celui auquel nous étions habitués, mais la liberté dont nous jouissons pour établir certains de nos devoirs ne me déplaît pas, au contraire. Je viens d'être classé premier en discours français.* » Son professeur le félicite et l'incite même à abandonner les mathématiques, ce qui, à n'en point douter, aurait également fait plaisir à son père latiniste. Édouard Branly obtient de bons résultats en mathématiques, physique et chimie, sans pour autant décrocher les premiers prix dans ces matières. En 1864, après deux années de préparation (1862-1863 et 1863-1864), il se présente au concours d'entrée de l'École Polytechnique : il est admissible, mais ne passera pas la barre de l'oral<sup>1</sup>. Cet échec à l'oral confirme le jugement porté sur l'un de ses bulletins du lycée Henri IV : « *Manque un peu d'activité et de fermeté pour les exercices au tableau.* » L'année 1865 se termine mieux, Édouard obtient le 2<sup>e</sup> prix d'excellence au lycée et surtout est reçu septième au concours d'admission de l'École Normale Supérieure (section sciences) avec une excellente note en physique (18/20) et une note qui le déçoit en géométrie descriptive (15/20). Il écrit lui-même : « *J'espérais une meilleure note en géométrie descriptive. Il me semblait avoir traité la question sans que l'on pût reprendre la plus légère erreur.* » Son professeur de physique, Édouard Desains ne doutait pas de ce succès,



Édouard Branly  
à 19 ans.

<sup>1</sup> Édouard Branly est déclaré admissible le 11 août 1864, il n'a pas encore 20 ans (il les aura le 23 octobre 1844). L'École Polytechnique imposait alors l'âge limite de vingt ans pour être élève.

il écrit à son ami Édouard Joseph Branly : « Je vous remercie de la bonne nouvelle que vous m'avez donnée de l'admission d'Édouard à l'École Normale, elle m'a fait un grand plaisir. Je m'y attendais, j'y comptais ; cependant je désirais toujours en avoir la certitude officielle. » La performance de Branly est excellente, car l'année 1865 enregistre un nombre record de candidats (236), alors qu'il n'y a que 14 places mises en concours.

## Les années d'études à l'École Normale Supérieure

---

L'arrêté de nomination d'Édouard Branly à l'École Normale date du 30 octobre 1865 et est signé du ministre de l'Instruction publique Victor Duruy. Depuis 1857, les études scientifiques de l'École Normale sont sous l'autorité de Louis Pasteur. L'École est dirigée par Désiré Nisard aidé par deux directeurs des études, l'un pour les sciences (Pasteur), l'autre pour les lettres (Jacquinet). Pasteur a également en charge l'administration, il est à ce titre chargé de la surveillance, de la discipline générale et de la gestion économique. L'École est administrée par Pasteur d'une main de fer. Il faut dire que lorsque ce dernier est arrivé, l'École traversait des temps difficiles, malgré son récent emménagement (1847) rue d'Ulm : « L'École n'est plus que l'ombre d'elle-même », disait-il. Le seul laboratoire de la rue d'Ulm est celui du chimiste Henri Sainte-Claire Deville. Pasteur dû, quant à lui, se contenter pour établir son « laboratoire » de deux pièces situées dans un grenier. Dans une lettre à son ami Chappuis, Pasteur écrit : « Je poursuivrais en ce moment les conséquences de ces faits si une température de 36° ne m'éloignait de mon laboratoire ou mieux de mon réduit. Je vois avec regret les plus longs jours de l'année perdus pour mon travail. Néanmoins je m'habitue à mon grenier et j'aurais peine à le quitter. J'espère l'agrandir aux vacances prochaines. Tu luttas comme moi contre les difficultés matérielles de ton travail. Il faut y prendre, mon cher, un nouvel aiguillon et non le découragement. Nos découvertes n'en auront que plus de mérite. » Branly, quelques années plus tard, connaîtra exactement les mêmes difficultés et ses découvertes, comme celles de Pasteur n'en auront, en effet, que plus de mérite.

Édouard Branly passe trois ans à l'École Normale, de 1865 à 1868. Édouard Herriot, auteur d'un ouvrage sur l'École<sup>2</sup>, nous la dépeint ainsi : « Avions-nous tort de croire que cette époque de 1856 à 1870<sup>3</sup> est, dans

<sup>2</sup> Normale, Édouard Herriot, Nouvelle société d'édition, 1932.

<sup>3</sup> Époque qui correspond à peu près aux années Pasteur, puisqu'il fût responsable de l'administration et directeur des études scientifiques de 1857 à 1867.



L'École Normale Supérieure.

*l'histoire de l'École Normale Supérieure l'une des plus riches, et même, selon toute vraisemblance, la plus féconde ? L'esprit de Pasteur l'anime et la domine. Si grand par ses propres découvertes, il nous apparaît être plus utile encore par le mouvement qu'il a déterminé, en excitant des générations qui, même si elles se consacrent aux lettres, semblent pénétrées par le rayonnement de ses méthodes. Il y a des heures où le petit laboratoire de la rue d'Ulm devient sans qu'il s'en doute – ce n'est pas le moindre de sa beauté – comme le centre spirituel du monde. »* Herriot évoque d'ailleurs notre physicien : « [...] Branly, modeste normalien de 1865, ne sera discerné que beaucoup plus tard. » Branly est très assidu et très bon élève, le grand mathématicien Charles Hermite<sup>4</sup> indique : « M. Branly a témoigné plus particulièrement du zèle et de la bonne volonté à suivre mes cours. J'ai les meilleures espérances. » Lors de son passage à l'École Normale, Branly se fait des amis pour la vie, ceux qui compteront le plus sont Prosper Pein, Jules Violle et le futur physicien Émile Amagat.

### Émile Hilaire Amagat (1841-1915)

Émile Amagat naît à Saint-Satur (près de Sancerre) dans le Cher en 1841. Après ses études à l'École Normale, il se consacre à l'étude de la compressibilité des gaz, objet de sa thèse. Nommé professeur à l'université de Lyon, il poursuit ses recherches et s'intéresse particulièrement au domaine des pressions élevées. Grâce à la construction d'une presse hydraulique de son invention, il étend les mesures de compressibilité des gaz et des liquides jusqu'à des pressions de 3000 atmosphères. Il donne son nom au diagramme dans lequel on porte le produit  $PV$  en fonction de  $P$  ( $P$  = Pression ;  $V$  = Volume), ce qui permet de visualiser les écarts à la loi des gaz parfaits. Les mesures d'Amagat permettront de valider l'équation d'état des fluides du hollandais Van der Waals tenant compte des forces moléculaires et du volume fini des molécules et permettant de déterminer les propriétés de l'équilibre liquide vapeur. Amagat s'éteint chez lui à Saint-Satur en 1915.

Par un curieux hasard, Amagat remportera son élection à l'Académie des sciences, en 1902, contre Pierre Curie (qui fut élu en 1905), tandis que son camarade Branly la remportera face à Marie Curie en 1911 (elle décida alors de ne plus se présenter).

---

<sup>4</sup> Charles Hermite est professeur à l'École Normale Supérieure, à Polytechnique, à la Sorbonne ainsi qu'au Collège de France. Il démontre la transcendance du nombre  $e$  et résout l'équation du 5<sup>e</sup> degré. On lui doit également la notion « d'espace hermitien » qui trouvera plus tard d'importantes applications en mécanique quantique.

Branly est encore à l'École lorsque survient un incident qui va la bouleverser. L'histoire commence de façon bien inoffensive. Sainte-Beuve, qui a été Maître de conférence en littérature française à l'École Normale de 1857 à 1861, est sénateur depuis 1865. Il est chargé à ce titre de s'occuper d'une plainte adressée par des notables de Saint-Étienne, protestant contre l'introduction dans les bibliothèques de la ville d'ouvrages de Voltaire, Jean Jacques Rousseau, Jules Michelet, Eugène Sue, Honoré de Balzac, Georges Sand et d'autres. Le rapporteur du Sénat a approuvé la pétition des stéphanois, mais Sainte-Beuve la repousse dans un discours virulent fait au Sénat le 21 juin 1867. Ce discours soulève un véritable tumulte, d'abord au Sénat, puis rapidement dans le pays par presse interposée. Les élèves de l'École Normale félicitent Sainte-Beuve de sa décision par le courrier suivant, signé de l'un d'entre eux, Lallier, exprimant le sentiment de « *soixante dix-neuf de ses camarades* »<sup>5</sup> : « *Nous vous avons déjà remercié d'avoir défendu la liberté de pensée méconnue et attaquée ; aujourd'hui que vous venez de plaider encore pour elle, nous vous prions de recevoir de nouveau nos remerciements. Nous serions heureux si l'expression de notre sympathie reconnaissante pouvait vous consoler un peu cette injustice. Il faut du courage pour parler au Sénat en faveur de l'indépendance et des droits de pensée. Mais la tâche, en devenant plus difficile, devient aussi plus glorieuse. De tous côtés en ce moment, on envoie des adresses : vous pardonnerez aux élèves de l'École Normale d'avoir suivi l'exemple général et d'avoir fait, eux aussi, leur adresse à M. Sainte-Beuve.* »



Louis Pasteur,  
directeur des études  
de l'École Normale  
Supérieure.

L'affaire aurait pu en rester là, mais Étienne Arago<sup>6</sup>, le plus jeune frère de François Arago, publie la lettre dans le journal *L'avenir national* du 2 juillet, sans songer aux règlements universitaires qui interdisent aux élèves toute manifestation politique. Le directeur du personnel du ministère de l'Instruction publique prescrit aussitôt une enquête. Dès le 3 juillet, Pasteur écrit à la mère du signataire de la lettre que son fils est exclu provisoirement de l'École. Les élèves protestent, mais Pasteur demeure inflexible. De son côté, le ministère désapprouve le renvoi provisoire de l'élève. Pasteur indique au directeur du personnel « *que si une répression énergique n'a pas lieu, il offrirait à M. le Ministre sa démission* ». Pasteur écrit également une longue lettre d'explication à Sainte-Beuve dans laquelle il indique : « *[...] Lorsque les élèves ont réclamé la réintégration de Lallier, je n'ai cessé de leur tenir le langage suivant : non seulement Lallier doit être hors de l'École, mais il est de toute nécessité que les deux élèves qui ont été les auteurs de la publicité donnée*

<sup>5</sup> Il y avait à l'époque cent un élèves pour les trois promotions réunies. Branly faisait partie des non « signataires » de la lettre, estimant cette agitation inutile et gênante pour le travail.

<sup>6</sup> Étienne Arago est, avec Maurice Alhoy, le fondateur du journal *Le Figaro*.

à la lettre viennent se déclarer et quittent l'École jusqu'à la décision du ministre. Si vous agissez ainsi, je me constitue sur le champ auprès de Son Excellence l'avocat de la clémence pour tous les signataires et pour les trois élèves exclus provisoirement. Dans le cas contraire, je demanderai une répression énergique, et si elle n'est pas ce que je croirai juste et suffisant dans l'intérêt de l'École, je donnerai ma démission sans hésiter... » Finalement, le 9 juillet, l'École est licenciée et les normaliens sont incités à adresser individuellement au Ministre leur regret, seul l'un d'entre eux ne l'a pas fait et a été considéré comme démissionnaire. Lallier n'a pas été gracié, mais ayant terminé sa scolarité, il a été nommé professeur au lycée de Sens. L'École sera reconstituée à la rentrée suivante et les cours reprendront normalement le 15 octobre. Les trois dirigeants de l'École, Nissard, Pasteur et Jacquinet cessent alors leur fonction : Nissard est remplacé par Francisque Bouiller à la tête de l'École, Pasteur cède sa

## L'École Normale Supérieure

L'École Normale Supérieure est fondée presque en même temps que l'École Polytechnique, par un décret de la Convention en date du 9 Brumaire An III (30 octobre 1794). Ce décret fait suite à un rapport de Lakanal suggérant de créer une École destinée à « régénérer l'esprit humain dans une république de 25 millions d'hommes que la démocratie rend tous égaux ». Le but est de former des maîtres qui enseigneront au peuple français tout l'ensemble des connaissances humaines. Il s'agit de transposer dans la pratique l'Encyclopédie du XVIII<sup>e</sup> siècle et de faire de l'École Normale « l'Encyclopédie vivante ». Trois mois plus tard, l'École est opérationnelle et les premiers cours ont lieu le 20 janvier 1795 dans l'amphithéâtre Verniquet, au Jardin des Plantes. Laplace fait la première leçon (Monge qui hait Laplace a fait appel à Lagrange pour les cours de Polytechnique !). René-Just Haüy présente les méthodes de la physique, tandis que Monge enseigne la géométrie descriptive. Parmi les premiers élèves figure Joseph Fourier qui enseignera à Polytechnique dès l'année suivante. Legendre figure au nombre des premiers professeurs de l'École Normale, avec Lagrange et Berthollet. L'École est supprimée dès la fin des premiers cours, qui ne dure d'ailleurs que quatre mois, en mai 1795. Elle est refondée par Napoléon, le 17 mars 1808, sur des bases plus strictes. C'est en 1847 qu'elle s'installe rue d'Ulm. Galois, Pasteur, Branly, Appel, Painlevé, Hadamard, Cartan, Borel, Cotton, Langevin, Perrin « feront » la « rue d'Ulm » ; ils seront suivis par Étienne Bloch, George Bruhat, Léon Brillouin, Francis Perrin, Pierre Auger et bien d'autres savants illustres.

place de directeur des études scientifiques à son ami Bertin et le poste de directeur des études littéraires est supprimé. Nisard est nommé sénateur inamovible, Pasteur reste à l'École Normale. On crée pour ce dernier un laboratoire de chimie physiologique où il pourra se consacrer entièrement à ses recherches. Quant à Jacquinet, il est nommé inspecteur général de l'enseignement secondaire. Comme l'a dit le normalien Roger Fayolle dans la Revue d'Histoire littéraire, « *curieuse affaire en vérité, dans laquelle l'administration de l'École s'empresse de sévir par peur du ministère et le ministère de regretter une telle sévérité par peur de l'opinion.* »

Branly obtient, au bout des deux premières années, la licence ès sciences mathématiques et la licence ès sciences physiques, comme cela est exigé par l'École. La troisième année est consacrée à la préparation du concours d'agrégation. À l'issue du concours de 1868, six candidats sont déclarés « *aptes à l'agrégation des sciences physiques et naturelles* ». Branly est reçu troisième. Deux élèves seulement de la promotion 1865 réussissent les examens de l'agrégation de 1868, Branly en sciences physiques et Noguès en sciences mathématiques.

Branly dit lui-même : « *Sur la douzaine d'élèves de sciences de la promotion qui quittait l'École Normale en 1868, après trois années d'études réglementaires, deux seulement s'étaient spécialement consacrés aux sciences physiques pendant leur troisième année d'études [...] c'étaient celui qui avait été classé le premier à l'entrée de l'École en 1865 et moi. Des deux, je fus le seul reçu au concours de l'agrégation des sciences physiques et naturelles.* »

## La Sorbonne

---

À sa sortie de l'École Normale, au deuxième semestre de 1868, Branly est nommé au lycée impérial de Bourges. Il souhaite s'aménager un petit laboratoire de physique pour y faire ses recherches, mais le rectorat refuse : « *M. Branly n'est pas fondé dans sa demande, il est nécessaire que la classe de physique soit mise successivement à la disposition de tous les professeurs. L'intérêt général du lycée est supérieur à des considérations personnelles* ». Branly se rend compte qu'il n'est pas adapté pour l'enseignement dans un lycée, il écrit : « *Je me sens devenir épais* ». Heureusement, la Sorbonne manque d'enseignants en physique : deux chaires de physique ont été créées dans le cadre de l'École des Hautes Études, l'une est tenue par Jules Jamin, l'autre par Paul Desains. Jules Jamin, ancien élève de l'École Normale, professeur à Polytechnique et à

la Sorbonne entre à l'Académie des sciences précisément en cette année 1868 (il en deviendra le président en 1882, puis le secrétaire perpétuel en 1884). Son nom reste attaché à un interféromètre permettant la mesure de faibles variations d'indice de réfraction. Paul Desains est le frère d'Édouard Desains, que nous avons rencontré plus haut comme professeur de physique au lycée Napoléon. Les Desains étaient, rappelons-le, originaires de Saint-Quentin et amis du père de Branly. Grâce à l'intervention de Paul Desains, Édouard Branly est nommé chef du laboratoire de physique de l'École Pratique des Hautes Études et s'installe à la Sorbonne le 26 décembre 1868. Son passage à Bourges aura été de courte durée ! Il s'installe au 49 rue Gay-Lussac dans un quartier qu'il commence à bien connaître. Dès l'année suivante, il co-signe avec Paul Desains sa première communication à l'Académie des sciences qui s'intitule « Recherche sur le rayonnement solaire ». Son activité à l'École Pratique des Hautes Études lui laissent du temps libre, il commente ainsi cette période : *« Une fois l'installation et l'organisation terminée pour la reproduction périodique des expériences fondamentales à faire répéter par les élèves pendant le cours de l'année, je n'étais guère occupé chaque semaine que pendant quatre matinées. Le reste de mon temps était libre et mon premier souci était d'entreprendre un travail qui me conduisit à une thèse de doctorat ès sciences »*. Malheureusement ce souci sera de courte durée car la guerre de 1870 est déclarée le 19 juillet.

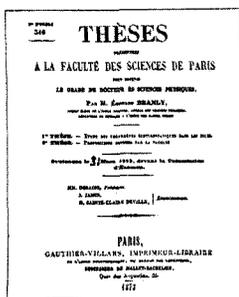
Branly est affecté aux fortifications comme sous-lieutenant du génie. La défaite est rapide et le siège de Paris commence. Branly est alors nommé ingénieur observateur d'abord au Fort de Romainville, puis à la Porte Maillot. On connaît la suite, capitulation du siège de Paris le 28 janvier 1871 puis révolution de la Commune en mars. La guerre civile survient, elle montre, suivant les mots de Renan *« une plaie sous la plaie, un abîme au-dessous de l'abîme »*. La paix revenue, le laboratoire de Paul Desains peut rouvrir ses portes le 20 juin 1871. Branly décide alors de préparer sa thèse sur l'électricité statique. Les conditions matérielles ne sont pas celles que pouvait espérer notre jeune savant. *« En dehors des appareils mis couramment à la disposition des amateurs ou des candidats à la licence ès sciences physique, dit Branly, le laboratoire n'offrait que peu de ressources. S'il était bien outillé pour les sujets spéciaux qui faisaient l'objet des investigations personnelles du Professeur Desains depuis de longues années, et auxquelles je n'étais pas appelé à prendre part, les moyens de travail pour les branches de la physique étrangères aux rayonnements calorifiques [on dirait aujourd'hui infrarouges] et lumineux faisaient défaut »*. On sent dans cette citation une pointe d'amertume, son maître Desains fait cavalier seul et ne se soucie guère des recherches de son thésard. Un autre témoignage de Branly nous renforce dans cette conviction : *« [...] Mon domaine était une petite pièce, mal éclairée, où j'avais le privilège de n'être troublé par personne, mais où toute installation était fort à l'étroit »*.

Branly précise un peu plus loin sa pensée : « *Je n'avais en aucune circonstance d'aide pour quoi que ce soit* ». Néanmoins l'avancement de ses travaux est ponctué par des communications à l'Académie des sciences : « Mesure de la polarisation de l'élément voltaïque » (19 février 1872) puis « Mesure de l'intensité des courants au moyen de l'électromètre » (12 août 1872). Notons que durant cette période, Branly est également interrogateur<sup>7</sup> au Lycée Saint-Louis (grand lycée parisien situé en face de la Sorbonne) et devient l'un des tout premiers membres de la Société Française de Physique créée en 1873 et dont le premier président est Fizeau.

## Les origines de la Société Française de Physique

La Société Française de Physique (SFP) a été créée le 17 janvier 1873. Elle ne compte, la première année, que 70 membres, la plupart venant des milieux académiques parisiens. La société est administrée par un « Bureau » et un « Conseil ». Ses statuts sont rédigés par cinq personnalités : Alfred Cornu (professeur à l'École Polytechnique, il est en particulier connu pour ses mesures précises de la vitesse de la lumière) ; Charles d'Almeida (qui peut être considéré comme le fondateur de la SFP) ; Jean-Baptiste Gernez (qui sera Maître de Conférence à l'ENS à partir de 1881) ; Antoine Lissajous (successivement professeur au Lycée Saint-Louis, Recteur de l'Académie de Chambéry, puis de Besançon, il est connu pour les courbes qui portent son nom) ; Eleuthère Mascart (il aura une forte implication dans l'Exposition internationale d'électricité de 1881, il sera le premier directeur de la Société Internationale des Électriciens (1883), ainsi que du Laboratoire Central d'Électricité (1888) et sera à l'origine de l'École Supérieure d'Électricité (1894)). Sous l'impulsion de ces pionniers, le nombre de membres de la SFP passera à 199 dès l'année suivante (1874) et en comptera plus de 1000 dès 1900. Dès ses débuts, la SFP organise une exposition annuelle et édite un bulletin. L'électricité est le sujet dominant des années 1880 et 1890. Au tournant du siècle, les travaux de physique mathématique sont également considérés, et Henri Poincaré devient en 1902 président de la Société ce qui est emblématique de cette percée.

<sup>7</sup> Dans les classes préparatoires aux Grandes Écoles se déroule chaque semaine des « interrogations » (encore appelé dans le jargon de ces classes des « colles ») dans chaque matière scientifique. À partir d'un programme identifié (correspondant aux derniers cours donnés par le professeur), les interrogateurs (ou « colleurs ») font passer un oral aux élèves, généralement sous forme d'exercices. Ce système permet la préparation à l'oral des concours.



Mémoire de thèse  
de physique  
d'Édouard Branly.

En mars 1873, Branly soutient sa thèse intitulée « Études des phénomènes électrostatiques dans les piles »<sup>8</sup>. Les membres du jury sont Paul Desains (Président), Jules Jamin et Henri Sainte-Claire Deville. Ce dernier est considéré par Louis Pasteur comme l'un de ses maîtres : il a en particulier développé lors de son passage à l'École Normale un premier laboratoire de chimie. On peut comprendre la présence de Sainte-Claire Deville dans le jury de Branly. D'une part, Branly a fréquenté son laboratoire de chimie à l'École Normale, d'autre part, l'un des thèmes de recherches de Sainte-Claire Deville est lié aux propriétés optiques des composés chimiques. Or l'optique est chère à Desains et il est difficile d'évoquer les propriétés des piles sans faire appel à la chimie. Sainte-Claire Deville félicite d'ailleurs Branly pour son travail, en particulier pour un appareil (un électromètre) qu'il a inventé et fabriqué durant sa thèse.

Le rapport de thèse est rédigé ainsi : « À l'aide d'un électromètre nouveau, Branly a confirmé, d'une manière inattaquable, divers résultats qui pouvaient encore donner lieu à contestation. Il a évalué, par une méthode toute nouvelle, la résistance des circuits et donné les moyens de déduire la mesure absolue d'un courant, de la seule observation de son électromètre. M. Branly a été admis au grade de docteur à l'unanimité des suffrages. »

Après la soutenance de sa thèse, Édouard Branly devient directeur-adjoint du laboratoire. Il semble alors destiné à poursuivre une brillante carrière à la Sorbonne, mais un « incident » s'y oppose. Sa fille, Jeanne Terrat-Branly<sup>9</sup> nous en raconte les circonstances : « Paul Desains s'est attaché à lui par les liens de la collaboration quotidienne et songe de plus en plus sérieusement à resserrer ces liens. En un temps où les jeunes hommes confient généralement à leurs familles le soin de les marier, il apparaît au bon maître que son protégé se montrera enchanté de cet arrangement. Aussi multiplie-t-il les invitations dominicales, aussi s'efforce-t-on de plus en plus, chez lui, d'accueillir Édouard comme un fils. Le jour où Édouard Branly s'en aperçoit, il accentue sa réserve naturelle. Il n'aime pas qu'on le « prenne en main », que l'on dispose de sa personne et de son avenir, mais trop respectueux pour manifester à Desains l'agacement qu'il éprouve à se voir traiter comme si son siège était fait, il se contente de refuser une invitation et de se montrer, avec Mlle Desains, l'aînée des filles du professeur, d'une correction polie. Celle-ci,

<sup>8</sup> La thèse d'Édouard Branly porte la dédicace suivante : « À la mémoire de M. Édouard Desains. À mon maître, M. Paul Desains ». Notons d'une part, qu'il s'agit de la première thèse française sur le potentiel électrique, d'autre part, qu'au début des années 1870 on ne compte que trois ou quatre thèses de sciences physiques par an à Paris.

<sup>9</sup> Mon père Édouard Branly, Jeanne Terrat-Branly, Ed. Corrêa, 1947.

du reste, ne semble point particulièrement désireuse de combler le vœu de son père, car elle est d'esprit bien trop fin pour ne pas deviner les réticences du jeune savant. Mais Desains a décidé de brusquer les choses, et il emmène, à cet effet, sa fille dans le voyage qu'il va faire en Suisse en compagnie de son directeur adjoint [Branly]. Les voyages ne forment pas seulement la jeunesse : ils autorisent un laisser-aller, une familiarité qui permettront certainement au timide Branly de se déclarer. Car le professeur est convaincu que seule, la timidité retient son collaborateur sur la pente des aveux... Prétextant un amour subit des promenades solitaires, Desains laisse souvent, très souvent, les deux jeunes gens en tête-à-tête. C'en est trop ! L'instinctif besoin d'indépendance qui, toute sa vie caractérisera Édouard Branly, se révolte et va se manifester sur-le-champ par une rupture brutale. Mais comme il ne connaît pas de demi-mesures, le jeune homme laisse entendre qu'il ne reviendra pas sur sa décision, et que Desains ne doit plus compter sur lui, désormais, à la Sorbonne. » Durant l'année scolaire 1874-1875, Branly fait un remplacement au collège Rollin (actuellement lycée Jacques Decour). Bien que son enseignement soit apprécié, son remplacement n'est pas renouvelé et il est ramené à son laboratoire de la Sorbonne. Par ailleurs, l'argent du laboratoire sert à acheter le matériel nécessaire aux recherches de son maître Desains mais il ne reste rien pour le matériel dont Branly a besoin. L'année 1875 marque par ailleurs, le terme de son engagement décennal de normalien à servir l'État. Branly prévient alors Desains de son départ éventuel, ce dernier ne fait pas d'objections et l'engage à réfléchir et à avoir des exigences auxquelles ses fonctions actuelles lui donnent droit. Branly quitte finalement la Sorbonne le 15 décembre 1875.

Pierre Curie deviendra, en 1878, le préparateur de Paul Desains, son premier travail sera consacré à l'étude des rayonnements caloriques (infrarouges), sujet de prédilection de Desains.

## Professeur à l'Institut Catholique

---

Peu après que la loi du 12 juillet 1875 sur la liberté de l'enseignement supérieur ait été votée, c'est par une lettre pastorale signée par deux cardinaux, trois archevêques et dix-neuf évêques que l'université catholique de Paris est fondée le 8 septembre 1875. Cet établissement libre d'enseignement supérieur s'installe sur le site de l'ancien couvent des Carmes (construit en 1613), où avait été fondée en 1845, par Monseigneur Affre, l'École des Hautes Études ecclésiastiques, maintenant Séminaire des Carmes. Le couvent des Carmes est décrit de façon admirable par Alfred Baudrillart<sup>10</sup> comme étant un « lieu sacré qui

<sup>10</sup> Alfred Baudrillart, qui deviendra en 1907 recteur de l'Institut Catholique de Paris, était également normalien, ce qui a fait dire à Édouard Herriot, lorsqu'il prononça son éloge lors de sa succession à l'Académie française : « L'École a fourni des recrues pour toutes les carrières : écrivains, poètes, auteurs dramatiques, critiques (en abondance), diplomates, explorateurs, politiciens et même des professeurs. Elle a aussi formé des prêtres... »

*parle à l'imagination, au cœur, à l'âme tout entière de ceux qui l'habitent ; pacifique oasis de verdure en plein Paris, dominée par le campanile et le dôme de sa grave et touchante église, coin de Toscane, souvenir florentin de ceux qui la fondèrent, Marie de Médicis, Concino Concini, Eleonora Galigai... le couvent des Carmes, qui avait vu les premiers labeurs intellectuels d'un Lavigner et qui, définitivement, par la générosité du Cardinal Guibert, se transformait en temple de science, Sorbonne Catholique, à quelques minutes de l'autre, sa contemporaine quant aux murs, la Sorbonne du cardinal de Richelieu ».* Notons que grâce au physicien Léon Foucault, nous pouvons nous faire une idée très précise de cet endroit. En effet, mettant à profit ses talents de daguerréotypiste, Foucault prend une « photo » depuis les toits de la maison où habite sa mère, au 34 rue d'Assas. Cette photo, d'excellente qualité, nous montre que le quartier n'a pratiquement pas changé depuis. Il y avait également sur ce site, depuis 1866, un externat de lycéens, l'École Bossuet, fondée par l'abbé Thenon.

L'Institut Catholique  
de Paris.



La nouvelle université est confiée à l'abbé Maurice d'Hulst<sup>11</sup>. Problèmes de locaux, disette d'argent, choix des collaborateurs, tout repose sur ses épaules. Cette université abrite une faculté de lettres, une faculté de sciences et une faculté de droit. Il y est également prévu une faculté de médecine, qui finalement se réduira à l'hôpital Saint-Joseph.

<sup>11</sup> Maurice le Sage d'Hauteroche d'Hulst (1841-1896) deviendra, en 1881, le premier recteur de l'Institut Catholique de Paris, le Pape Léon XIII le fera prélat.

L'abbé d'Hulst contacte Branly, mais ce dernier hésite comme le montre cette lettre du futur recteur en date du 26 novembre 1875 : « *Je comprends et je respecte les motifs qui vous font reculer. Cela ne m'empêche pas de sentir vivement la perte que nous faisons* ». Finalement Branly revient sur sa décision, quitte la Sorbonne, et fait son premier cours à l'université catholique de Paris le 29 décembre 1875<sup>12</sup>. La nouvelle université est inaugurée le 10 janvier suivant par le cardinal Guibert qui indique dans son discours : « *Nous n'aspérons pas à détruire ce qui se fait sans nous ou hors de nous. Mais nous espérons, par l'usage honorable de notre liberté, imprimer au mouvement intellectuel de notre pays une salutaire impulsion et servir par là les intérêts de la science, de la morale et de la religion* ». Nul doute qu'un tel discours ne peut qu'enthousiasmer le jeune Branly. Il est nommé officiellement le 19 janvier 1876 « professeur titulaire de la Faculté des Sciences » par le « Conseil supérieur des archevêques et évêques fondateurs de l'université catholique ».

Le fils d'un ancien condisciple de Branly, Paul Trocmé, résume la situation en disant « *pour éviter d'épouser la fille de son maître préféré (Paul Desains), Édouard Branly ne trouve pas d'autre moyen que de tourner le dos à la fille, au père, au laboratoire, à l'université (la Sorbonne)* ». À cela s'ajoute sans doute l'espoir d'avoir un laboratoire dans lequel il puisse faire ses recherches et la joie de contribuer à l'élaboration d'un enseignement supérieur catholique. On peut toutefois se demander pourquoi il choisit aussi de démissionner de l'université ? Après tout, deux de ses nouveaux collègues, et non des moindres, Lapparent et Lemoine ont trouvé un compromis : ils sont professeurs à l'université catholique tout en gardant des attaches avec le monde laïque. Très probablement, en représailles de la démission d'Édouard Branly de la Sorbonne, le ministère met, en 1877, à la retraite son père Édouard Joseph ! Édouard Branly est outragé, il écrit à Brunet : « *Lorsque vous étiez Ministre, vous avez refusé de m'entendre ; il est nécessaire cependant que vous connaissiez l'objet de ma demande d'audience. Vous avez mis mon père à la retraite en déclarant que ma manière d'agir en était la cause... Vous m'avez CALOMNIÉ, sans me connaître, en m'accusant d'avoir agi sans délicatesse au moment où j'ai quitté le service de l'État...* » L'abbé d'Hulst fait remarquer à Branly : « *[...] Il ne faut pas avoir trop raison, ni le dire trop haut, ni vouloir humilier ceux qui, placés plus haut que nous, ont pu se tromper ou être trompés* ».

---

<sup>12</sup> Branly indique dans ses notes manuscrites qu'il va être amené à quitter en 1875 « l'Université d'État pour entrer à l'université catholique en formation où une belle installation appropriée à ses recherches personnelles lui est promise. »

## Albert de Lapparent et Georges Lemoine

Albert Auguste de Lapparent (1839-1908), ingénieur du corps des Mines, a été nommé à l'université catholique dès 1876. Géologue distingué, il a été un auteur prolifique et un vulgarisateur remarquable. Branly en parlait ainsi : « *Lapparent se meut dans les premiers âges de la Terre comme s'il avait contemplé de ses propres yeux les éruptions, inondations, convulsions du sol et autres cataclysmes avec une sûreté communicative qui rend bien modestes ceux qui l'écoutent* ». Il deviendra membre (1897), puis Secrétaire Perpétuel (1907) de l'Académie des sciences.

Georges Clément Lemoine (1841-1922) a été un chimiste réputé. On lui doit en particulier, à la suite des travaux de Faraday et Kékulé, d'importantes avancées sur la chimie des composés du phosphore et du soufre. Il deviendra membre (1899) puis Président (1921) de l'Académie des sciences.

Dès la fin de l'année 1875, l'abbé d'Hulst débloque un crédit de 40 000 francs (l'équivalent de 150 000 €) pour « *commander les appareils de physique nécessaires pour le cours de Licence* ». Cette somme confortable cachait en fait un quiproquo : l'abbé d'Hulst a en tête l'élaboration d'un cabinet de physique destiné à l'enseignement alors que Branly rêve d'un laboratoire de physique pour ses recherches ; il devra attendre 57 ans avant de voir son rêve se réaliser ! Édouard Branly se consacre à son enseignement, il fait découvrir à ses étudiants l'optique, la mécanique, l'acoustique, la thermodynamique, l'électricité... l'un de ses élèves témoigne : « *Il exposait les questions avec une clarté et une précision remarquable, il illustrait ses cours par des expériences bien préparées et parfaitement exécutées, le tâtonnement était inconnu* ». Pour ce qui concerne le laboratoire, Branly devra se contenter d'un ancien dortoir, mal éclairé, situé au premier étage du bâtiment donnant sur la trépidante rue de Vaugirard.

## Médecine et mariage

---

Cette situation précaire et la mise à la retraite de son père sont peut-être à l'origine de la recherche faite par Branly en 1877 d'une autre situation. Il a alors un contact assez étroit avec l'université catholique d'Angers où un poste lui est proposé et un laboratoire lui est promis. Cette proposition est intéressante d'autant qu'elle ne remet pas en cause son enseignement à Paris, mais finalement la tractation échoue. Il prend finalement la décision de faire des études de médecine. Cette décision

est peut-être motivée par l'exemple de son frère Edgar, qui allait soutenir sa thèse de médecine, et par son professeur de chimie à l'École Normale, Pasteur, qui commence à révolutionner ce domaine. Beaucoup plus tard, Branly en donnera l'explication suivante : « *Mon départ pour l'université catholique avait fait trop mauvais effet dans les milieux officiels pour que je puisse rentrer à la Sorbonne. Je résolus de faire mes études de médecine et de les pousser jusqu'à l'agrégation de physique médicale. J'aurais professé la physique à la faculté de médecine, au lieu de la professer à la faculté des sciences* ».

## Physique et médecine

Il n'est pas rare de voir des scientifiques ayant fait des études de médecine. Quelques grands physiciens en sont la preuve.

Nicolas Copernic (1473-1543) est d'abord étudiant à l'Université de Cracovie où il suit les cours de mathématiques, philosophie aristotélicienne, astronomie, droit, latin et grec, avant de devenir étudiant en médecine. Médecin réputé, il est chanoine de Frombork, en Warmie, où il occupe un appartement dans la cathédrale dans laquelle se trouve une petite tour abritant un observatoire. Il poursuit ensuite ses études à Bologne à partir de 1496 et c'est là qu'il fait sa première observation astronomique (l'étoile Aldébaran) le 9 mars 1497. Son œuvre majeure intitulée « *De revolutionibus orbium coelestium* » paraît l'année de sa mort en 1543. Il y décrit le système héliocentrique, « copernicien », dont le plus grand défenseur sera Galilée, véritable père de la physique.

Luigi Galvani (1737-1798), professeur d'anatomie à l'Université de Bologne, constate que la cuisse de grenouille, qu'il vient de disséquer, se contracte à chaque fois que le nerf et le muscle sont reliés par un arc formé de deux métaux différents. Galvani attribue ce phénomène à une « *électricité animale* », et entre en controverse avec Alexandro Volta (1745-1827) qui pense qu'il n'y a qu'une seule sorte d'électricité. Cette controverse est fructueuse puisqu'elle conduit Volta à l'invention de la pile (objet, rappelons-le, des premières recherches de Branly), dont Arago dira : « *Cette pile faite de tant de couples dissemblables, séparés par un peu de liquide, est, quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé...* »

Thomas Young (1773-1829) est un enfant prodige ; à treize ans il sait déjà le latin, le grec, le français et l'italien. Il apprend également l'hébreu, le persan, l'arabe, le chaldéen, le syriaque et le turc. On dit qu'à l'âge de 13 ans il maîtrise 13 langues. Ses camarades de collège le baptisent « *le phénomène Young* ». Il se lance finalement dans des

études médicales, ce qui lui vaut d'être élu membre de la Royal Society à 21 ans. Sa thèse de doctorat qui porte sur la production de la voix humaine lui permet d'approfondir les lois du son et de la propagation des ondes. Entre 1800 et 1807, il fait des travaux en optique qui le rendront célèbre, d'abord en relation avec la médecine sur la vision des couleurs (qu'il conclut par l'introduction des trois couleurs fondamentales), puis par la (ré)introduction de l'interprétation ondulatoire de la lumière (explication des interférences lumineuses). Super-intendant de l'Almanach nautique anglais, secrétaire du bureau des longitudes, architecte naval et consultant à l'amirauté, Young s'intéresse également à la dynamique des fluides et à la théorie des marées.

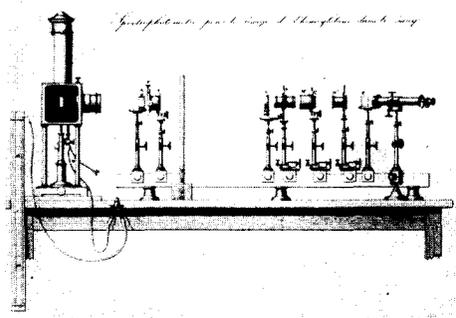
Hermann von Helmholtz (1821-1894) fait ses études de médecine à Berlin. D'abord médecin à Potsdam, il enseigne ensuite l'anatomie et la physiologie dans de grandes universités allemandes : Königsberg, Bonn et Heidelberg. Il invente un appareil pour examiner l'intérieur de l'œil et fait l'une des premières mesures de la vitesse de l'influx nerveux. Ses travaux en acoustique, à l'interface entre la médecine et la physique, seront justement célèbres (résonateurs de Helmholtz). En physique, il énonce le principe de conservation de l'énergie et réalise la synthèse électromagnétique la plus avancée avant celle de Maxwell. Il est alors considéré comme le « Chancelier de la physique allemande ». Il comptera parmi ses élèves Max Planck et Heinrich Hertz.

Sa puissance de travail lui permet de mener son métier en même temps que ses nouvelles études. Il est à la fois professeur et élève ! Il suit le matin les cours de médecine, il enseigne la physique en début d'après-midi et retourne à l'hôpital le soir. En 1880 intervient un événement qui a du conforter Branly dans le choix qu'il a fait : la loi Falloux sur la liberté de l'enseignement supérieur libre est abrogée. Plus précisément, le Parlement vote, le 18 mars 1880, une loi suivant laquelle le titre d'université (avec le prestige qui en résulte) est retiré aux établissements d'enseignement supérieur libre. Les deux facultés, de lettres et de sciences, sont supprimées suite à cette loi, mais l'abbé d'Hulst les fait renaître sous forme de deux écoles autonomes, chacune dirigée par un doyen. L'université catholique de Paris devient l'Institut Catholique de Paris et l'abbé d'Hulst en devient le recteur en 1881. Il tient tout particulièrement à ce que l'Institut soit un foyer scientifique de haut niveau<sup>13</sup>. Mais la gratuité des inscriptions dans les établissements d'État et le non émargement au budget de l'enseignement supérieur des

<sup>13</sup> C'est ainsi, par exemple, que les Congrès scientifiques internationaux des catholiques y seront fondés en 1888.

établissements libres, ne peuvent, naturellement, que soumettre le nouvel Institut Catholique à de graves problèmes financiers. Dans ce contexte, Branly ne devait pas regretter son choix, effectué trois ans plus tôt, de s'être donné les moyens d'assurer son indépendance.

Finalement, le 29 juin 1882, Branly soutient une thèse intitulée : « Dosage de l'hémoglobine dans le sang par des procédés optiques » et devient docteur en médecine. Il introduit sa thèse ainsi : « *Après avoir passé en revue divers procédés optiques, j'ai préféré la mesure de l'absorption exercée par l'hémoglobine dans les diverses parties du spectre, et spécialement dans la région des deux bandes d'absorption, caractéristiques de l'hémoglobine, comprises entre les raies D et F. Je me suis demandé s'il n'y avait pas de bandes d'absorption importantes dans la partie ultraviolette du spectre...* ». Il termine cette introduction en disant : « *J'en ai conclu l'identité spectrale de la matière colorante du sang chez les divers vertébrés* ». Deux points méritent d'être soulignés. L'optique, objet de ses premières recherches à la Sorbonne, joue un rôle central dans sa thèse. Il utilise un spectrophotomètre à faisceaux superposés qui est une amélioration des mesures colorimétriques utilisées jusqu'alors. De plus, sa mesure est fondée sur l'angle de rotation d'une lumière polarisée, ce qui n'est pas sans rappeler les techniques utilisées par son professeur de chimie à l'École Normale, Louis Pasteur, lors de ses premières recherches. Du point de vue médical, ses travaux sont également intéressants et seront à l'origine de recherches sur la conservation du sang. Dans l'esprit de Branly, sa thèse est une étape, non une finalité. Son objectif est de passer l'agrégation de physique médicale. Il faut pour s'y inscrire avoir l'autorisation du doyen de la faculté et celle du titulaire de la chaire. Les deux fonctions sont détenues par un seul et même homme, le docteur Gariel<sup>14</sup>. Il refusera d'inscrire Branly en disant : « *Vous êtes professeur à l'Institut Catholique, eh bien, restez-y !* », ce que notre physicien estimera



Spectrophotomètre utilisé par Branly lors de sa thèse de médecine.

<sup>14</sup> Il sera membre (1882) puis président de l'Académie de médecine (1912).

être un « *véritable abus de pouvoir* ». Curieuse décision du Doyen Gariel qui lui-même avait été physicien, ingénieur des Ponts et Chaussées, professeur de physique dans cette école, avant de devenir médecin ! Il n'était pas non plus particulièrement réputé pour des positions anticléricales. Peut-être, comme le suggère Philippe Monod-Broca<sup>15</sup>, sa décision reposait-elle sur le souci de protéger la carrière d'un de ses élèves ou de quelque autre candidat de qualité. Au moins peut-on se consoler en pensant qu'une chaire de physique médicale aurait peut-être détourné Branly de ses recherches et particulièrement de sa grande découverte qui allait mener à la radio.

### **Arsène d'Arsonval (1851-1940)**

Arsène d'Arsonval, de sept ans le cadet d'Édouard Branly, est mort la même année que lui à près de quatre-vingt dix ans. Plusieurs points communs rapprochent les deux savants qui seront d'ailleurs amis : ils sont tous les deux à la fois physiciens et médecins et sont des travailleurs infatigables. D'Arsonval est né à La Borie (en Haute-Vienne). Après des études au lycée impérial de Limoges, puis au collège Sainte-Barbe à Paris, il étudie la médecine. Il assiste en particulier aux cours de Claude Bernard au Collège de France, dont il devient le préparateur en 1873. Il dirige ensuite le laboratoire de biophysique du Collège de France (1882-1910) et succède à Claude Bernard comme professeur dans cette noble institution. D'Arsonval fait de nombreuses découvertes dans le domaine de l'électricité médicale ce qui lui permet de soigner diverses maladies par « d'Arsonvalisation ». Il étudie les effets médicaux des courants à haute fréquence. Par ailleurs, pour déceler les faibles courants qui interviennent lors de l'étude des contractions musculaires, il construit de nombreux appareils dont le plus connu est le galvanomètre balistique, réalisé en collaboration avec Deprez. À la fois médecin et physicien, il met au point le premier téléphone adopté par les « PTT », démontre expérimentalement le transport de l'énergie électrique, invente le vase d'Arsonval, vase de verre à double paroi (séparées par du vide), qui donnera plus tard nos bouteilles thermos. Il travaille avec Georges Claude sur la liquéfaction des gaz (1902), et fait naître la compagnie de l'Air Liquide. Il participe, avec le capitaine Ferrié, aux premières émissions TSF ainsi qu'aux premiers essais de téléphone sans fil (1911). Il devient membre de l'Académie de médecine dès 1888 et de l'Académie des sciences en 1894.

---

<sup>15</sup> *Branly au temps des ondes et des limailles*, Philippe Monod-Broca, Belin, 1999.

Pour la première fois de son existence, Branly n'a pas d'examen à préparer. Il n'a vécu jusque-là que pour ses chères études, mais à 38 ans il est grand temps de fonder une famille. Cependant, comme l'écrit sa fille « *un homme de son époque ne choisit pas lui-même sa fiancée, à moins que des circonstances familiales lui permettent de rencontrer des jeunes filles, ce qui n'est pas son cas, car il ne va jamais dans le monde, où il refuse de perdre son temps* ». Il s'ouvre de son projet de mariage à son ami normalien Prosper Pein. Malgré une vie bohème, son ami possède un souverain bon sens lorrain. Pein en parle à ses parents qui habitent Verdun et qui connaissent toutes les bonnes familles de cette ville. On pense alors à Jean Lagarde, négociant cosu et retraité qui a consacré une partie de son temps à élever sa fille Marie depuis la mort de sa femme survenue peu après la naissance de l'enfant. La jeune fille va avoir vingt-six ans, l'âge limite que s'est fixé Branly pour le choix de son élue ! Le mariage a lieu le 10 juillet 1882. Jean Lagarde alloue à sa fille une dot qui, ajoutée aux biens que la mariée a hérités de sa mère, assure au couple une certaine aisance.



Madame Branly, née Lagarde.

Le jeune couple part en voyage de noces dans le Finistère, puis au retour s'installe à Paris, rue Gay-Lussac. En prévision de la naissance de leur premier enfant, ils emménagent le 15 octobre 1882 dans un grand appartement de l'avenue de Breteuil, non loin des Invalides. Ils sont sûrs que leur premier descendant sera un fils, on l'appelle déjà Jean, mais le 24 août 1883 naît une fille, qui naturellement sera prénommée Jeanne ! Dix-huit mois plus tard, en 1885, naît un fils, Étienne. Édouard et Marie Branly sont heureux. Notre physicien partage son temps entre l'Institut Catholique et son appartement où il s'occupe beaucoup de ses enfants. Quelques années passent et, en 1889, naît un troisième enfant, une fille prénommée Élisabeth. Un an plus tard, le 21 octobre 1890, la mère d'Édouard Branly, Elisa, s'éteint. Édouard Joseph reste d'abord à Saint Quentin mais la solitude lui pèse et l'année suivante il part s'installer chez son fils. Pour accueillir le père, la famille déménage et s'installe dans un appartement plus grand, non loin du précédent, 21 avenue de Tourville. Ils y resteront jusqu'en 1928.

### Les enfants de Branly

Le couple Branly a trois enfants : Jeanne, Étienne et Élisabeth.

Jeanne Branly (1883-1977) se révèle une enfant studieuse. Elle sera l'une des premières femmes en France (sans doute la deuxième !) à passer le baccalauréat. En 1906, elle épouse Georges Terrat, docteur en droit et fils de Barthélemy Terrat, agrégé des facultés de droit, qui avait démissionné de l'Enseignement public pour rejoindre

l'abbé d'Hulst, à l'image d'Édouard Branly, devenant ainsi le premier doyen de la faculté de droit de l'enseignement catholique. Pour ceux qui ont connu Jeanne, ils savaient qu'une passion l'habitait : la littérature. Elle s'entoure d'hommes de théâtre, ses héros sont Edmond Rostand et sa femme, la poétesse Rosemonde Gérard, les tragédiens Sarah Bernhardt et Édouard de Max ! Jeanne est mère de trois filles, Geneviève, Cécile et Colette. Sa fille aînée devait épouser Pierre Abelin l'homme politique français. Jusqu'à un âge très avancé, elle conserve son goût de la littérature, le communiquant à ses sept petits-enfants, avec une grande jeunesse d'esprit. Elle aimait raconter comment, dans son enfance, aux aurores, son père faisait travailler la grammaire allemande et ses déclinaisons à ses deux aînés, exercice quotidien d'une demi-heure, avant d'aller à l'école. Dur ! Mais Jeanne allait couramment parler l'allemand, appréciant sa littérature !

Étienne Branly (1885-1953) après d'excellentes études au collège Stanislas suit les cours de son père à l'Institut Catholique et obtient sa licence de physique. Mais ses goûts profonds sont ailleurs et il bifurque vers l'Inspection des Finances, dont il réussit le concours en 1911. Pendant la première guerre mondiale, il est envoyé au Maroc, mais alors qu'un jour il balaye la cour un peu gauchement, le Maréchal Lyautey vient à passer : « *Qu'est-ce que c'est que ce garçon qui tient si mal son balai ?* » demande le Maréchal, « *il s'appelle Branly* », lui dit-on. « *Comment, Branly, le fils du grand Branly ?* », la confirmation est immédiate : « *En effet, il s'agit bien de lui* ». Le Maréchal demande alors qu'on le mette à son service, devinant qu'il manierait mieux la plume que le balai ! Étienne Branly est très vite apprécié par le Maréchal. À la fin de la guerre, et jusqu'à la fin de sa vie, il restera au Maroc et sera nommé directeur général des finances, poste qu'il occupera pendant dix ans. Il passera sa retraite dans sa maison des Oudaïas. À sa mort, en 1953, il sera enterré au Maroc.

Élisabeth Branly (1889-1972) est la plus jeune fille de Marie et Édouard Branly. Poète dès sa jeunesse, elle a un parcours singulier, attirée autant par la peinture que par la musique. De 1905 à 1920, elle se révèle humoriste et critique. Très sensible à la mode, son imagination et sa personnalité sont très vite remarquées et elle sera souvent appelée pour participer à des expositions et collaborer à différents ouvrages. Deux guerres assombrissent sa vie qui est pourtant passionnante. La première a une influence capitale puisqu'elle choisit comme discipline la peinture afin de répondre à son devoir d'infirmière en apportant son aide aux blessés. De 1920 à 1964, sa rencontre avec l'architecte Paul Tournon donne une nouvelle dimension à son art. Grâce à lui, elle participe à trois

expositions : Arts Décoratifs (1925), Exposition coloniale (1931) et Exposition internationale (1937). À ses œuvres s'ajoutent les trois baptistères situés dans les églises construites par son mari : Sainte-Thérèse à Élisabethville, le Saint-Esprit à Paris et le Sacré-Cœur à Casablanca. Édouard Branly vécut de 1927 à 1940 chez Élisabeth et Paul avec leurs deux petites filles, Florence qui devait devenir peintre et Marion architecte. Le savant souhaita que son gendre, l'architecte Paul Tournon, dont il estimait le talent, soit l'auteur de son nouveau laboratoire (très novateur en 1932 pour ses fondations spéciales et sa salle de cuivre). Élisabeth fit, entre 1939 et 1940, une série remarquable de croquis mémorisant, à la veille de la seconde guerre mondiale, les derniers instants de son père.



Les enfants de Branly : Jeanne, Étienne et Élisabeth.

## La découverte du 24 novembre 1890<sup>16</sup>

Depuis 1886, c'est-à-dire après la fin de ses études médicales, Édouard Branly a repris ses recherches. Il y consacre ses matinées, tandis que les après-midi sont réservés à l'enseignement. Ses soirées sont consacrées aux lectures et à la rédaction de notes et d'articles. L'objectif de ses



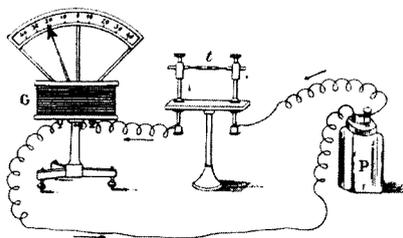
Édouard Branly et son préparateur Rodolphe Gendron dans la salle de cours de physique de l'Institut Catholique, vers 1890.

<sup>16</sup> Nous ne développons ici ni le contexte de la physique de l'époque, ni la découverte elle-même qui font, respectivement, l'objet des chapitres 2 et 3.

recherches est de comprendre pourquoi les corps, préalablement électrisés, perdent leur charge électrique sous l'influence du rayonnement. Avançant de façon très méthodique, il étudie le problème sous tous les angles. D'abord, il examine et perfectionne les sources de rayonnement. Suivant son habitude, c'est dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (CRAS) qu'il fait part de l'avancement de ses travaux. Sa première publication après sa thèse de médecine, qu'il fait dans les CRAS, date du 21 mars 1887, et porte précisément sur l'étude d'une source de rayonnement, elle s'intitule : « Sur l'emploi du gaz d'éclairage comme source constante de rayonnement ». Il lui faut également mesurer des courants de très faible intensité. Pour ce faire, il améliore l'étalonnage des galvanomètres ce qui le conduit à publier, de nouveau dans les CRAS, un article intitulé : « Un nouveau mode d'emploi du thermo-multiplicateur ». Il soumet toutes sortes de substances aux essais. Ici, il recouvre les métaux de laque et de vernis. Là, il les réduit en poudre, en limaille ou en grenaille soigneusement calibrée. Il teste plusieurs configurations : les différentes formes de métaux sont étalées sur une plaque de verre ou d'ébonite, ou bien placées dans un petit tube allongé. Branly s'intéresse aux travaux du physicien allemand Hallwachs, qui, poursuivant l'étude de l'effet photoélectrique découvert par Hertz au début de 1887, montre en 1888 que les feuilles d'un électroscope chargées négativement se rapprochent rapidement lorsqu'elles sont éclairées par de la lumière ultraviolette, phénomène qui ne se produit pas lorsque les feuilles de l'électroscope sont chargées positivement. Le 8 avril 1890, Branly publie dans les CRAS une note relative à « La déperdition des deux électricités par des radiations très réfrangibles<sup>17</sup> ». Le 4 mai, il réalise une variante de l'expérience de Hertz et note dans ses carnets le nom du physicien allemand, cela sera d'ailleurs la seule fois qu'il le fera (en revanche, il mentionnera plusieurs fois Hallwachs). Son dispositif est constitué de la façon suivante. D'un côté, il dispose d'une source de rayonnement produisant une étincelle, cette source est une bobine de Ruhmkorff ou une machine de Wimshurt. De l'autre côté, à quelques distances, il place un disque métallique dans un circuit fermé constitué d'une pile et d'un galvanomètre. Ainsi, il peut déterminer la conductibilité du disque métallique par la déviation de l'aiguille du galvanomètre. Il mesure inlassablement la variation de la conductibilité suivant que le disque est chargé positivement ou négativement, suivant l'éclat de l'étincelle, suivant sa distance au disque, etc. Il note, dans certains cas, une chute de résistance du disque métallique lorsque celui-ci est soumis à l'éclat de l'étincelle. Le 7 juin, « l'étincelle est à 5 cm de la plaque », le 9 juin « la plaque est à 1,50 m de l'étincelle », le 11 juin, « elle est à 6 m ». Il refait ses expériences systématiquement, tantôt dans son

---

<sup>17</sup> C'est-à-dire, les rayons ultraviolets.



Dispositif utilisé par Branly constitué d'une pile, d'un tube à limaille et d'un galvanomètre.

grand laboratoire, tantôt dans la salle de cours. Au décès de sa mère, survenu le 21 octobre, il interrompt ses recherches quelque temps. Le 18 novembre, il fait un constat surprenant. Il utilise le circuit décrit plus haut, mais le disque métallique est remplacé par un tube rempli de limaille. Lorsque la limaille est éclairée par l'étincelle, il constate sans surprise l'augmentation de la conductibilité, mais celle-ci chute dès que le tube à limaille subit un choc. Le 20 novembre, il refait l'expérience et note : « *La poudre de zinc est très sensible à l'étincelle de la machine de Wimshurt qui est placée à plus de 10 mètres... La déviation [de l'aiguille du galvanomètre] est supprimée par tapotement sur la table* ».

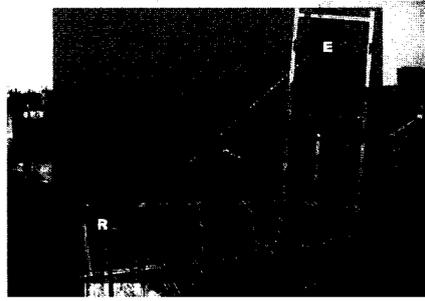
### La machine de Wimshurt

La machine de Wimshurt a été développée par le physicien britannique James Wimshurt (1832-1903). C'est une machine électrostatique qui utilise deux disques de verre tournant en sens inverse, et qui portent des secteurs métalliques sur lesquels viennent frotter des balais. Elle permet d'obtenir des hautes tensions.

### La bobine de Ruhmkorff

La bobine de Ruhmkorff est défini en ces termes par Branly dans son *Traité de physique* : « *C'est une source de courants induits de haut potentiel, dus aux variations rapides du champ magnétique d'un électroaimant. Elle fait naître des tensions intermittentes très élevées avec des sources continues qui n'ont elles-mêmes qu'une faible tension.* » Son nom vient du mécanicien et électricien allemand Heinrich Ruhmkorff (1803-1877) qui après avoir travaillé chez des fabricants d'instruments de précision, a fondé sa propre maison à Paris. Il perfectionne la bobine d'induction de Masson et Breguet. La bobine de Ruhmkorff ainsi réalisée (1851), en permettant d'obtenir de très hautes tensions, a favorisé de grandes découvertes dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, citons par exemple : le développement de l'analyse spectrale, l'étude des rayons cathodiques, l'alimentation des premiers tubes à rayons X, etc.

Lieu de l'expérience  
de novembre 1890.  
Branly se tient près du  
récepteur (R) et  
observe la déviation  
de l'aiguille du  
galvanomètre, tandis  
que son préparateur,  
Gendron, se trouve  
près de l'émetteur (E)  
et fait éclater  
l'étincelle.



Cette observation, aussi surprenante qu'importante, allait être suivie d'un second constat, encore plus radical. Laissons son préparateur, Gendron, nous rapporter les faits : « M. Branly fit éclater une étincelle entre les boules de notre machine de Wimshurt. Aussitôt que la lumière violette de l'étincelle éclairait la limaille, cette dernière laissait passer le courant ainsi qu'en témoignait l'aiguille du galvanomètre... Beaucoup en serait resté là, mais le génie de Branly lui inspira un mouvement. Il plaça un bout de carton devant la longue étincelle lumineuse de la machine et constata sur le galvanomètre que le courant passait toujours. Ainsi ce n'était pas la lumière, violette ou non, qui rendait la matière conductrice, c'étaient les ondes électriques. » Nous sommes ici au cœur de la découverte. Heureux hasard qui guide les pas d'Édouard Branly, mais comme l'a dit si justement Louis Pasteur, son maître, « dans le domaine de la science, le hasard ne favorise que les esprits préparés ». Mais laissons Gendron poursuivre : « Si ce sont les ondes électriques qui agissent sur la limaille, aucune raison pour que le même phénomène ne se produise pas, hors de portée des ondes lumineuses, à une distance beaucoup plus considérable... Toutes les fois que je faisais éclater une étincelle, l'aiguille du galvanomètre de M. Branly, à vingt mètres de moi entraînait en mouvement. Je pouvais ainsi envoyer des signaux à M. Branly. En effet, chaque fois qu'il avait constaté un mouvement de l'aiguille, il ébranlait par un choc le tube de limaille et l'aiguille du galvanomètre revenait à zéro. Elle recommençait à se déplacer lorsque se produisait une nouvelle étincelle. »

Branly vient ainsi de découvrir le phénomène de « radio-conduction », comme il le baptise lui-même. Le 24 novembre 1890, il fait part de sa découverte dans une note publiée dans les CRAS de Paris. Il indique comment l'action d'une décharge électrique générée par un oscillateur de Hertz fait chuter la résistance de son tube à limaille de « plus de 2 millions d'ohms à moins de 2 » et ajoute que la chute de résistance disparaît « en frappant quelques petits coups secs sur la tablette qui supporte le tube ». Branly décrit le dispositif utilisé : « Si on forme un circuit comprenant [une pile], un galvanomètre et le conducteur métallique

(tube à limailles), il ne passe le plus souvent qu'un courant insignifiant ; mais il y a une diminution brusque de résistance accusée par une forte déviation [de l'aiguille du galvanomètre], quand on vient à produire dans le voisinage du circuit une ou plusieurs décharges électriques... J'ai pu constater une action à plus de 20 mètres, alors que l'appareil à étincelles fonctionnait dans une salle séparée du galvanomètre par trois grandes pièces et que le bruit des étincelles ne pouvait être perçu. [...] Avec le tube à limailles, on supprime à peu près complètement la chute de résistance par divers procédés notamment en frappant quelques petits coups secs sur la tablette qui supporte le tube. »

## Du radioconducteur à la radio

Branly définissait en ces termes le radioconducteur : « Un radioconducteur est un contact imparfait, d'une nature spéciale, entre substances plus ou moins conductrices. Il a pour caractère d'offrir une énorme résistance à un courant de faible voltage, et de perdre sa résistance, d'une manière persistante, quand il a été parcouru par les courants induits que fait naître dans son circuit une étincelle de décharge de condensateur qui éclate dans le voisinage. Un choc lui rend sa résistance. Le nom radioconducteur, donné à ce contact imparfait, rappelle sa propriété de devenir conducteur quand il est exposé à l'action rayonnante d'une étincelle. » Branly est l'un des tout premiers à utiliser le préfixe « radio ». Le radioconducteur a été le premier récepteur de la Transmission Sans Fil (TSF), il a été utilisé pour ce qui allait devenir tout simplement et universellement « la radio ».

Ce radioconducteur, que Lodge appellera « cohéreur » en 1894, permet de révéler de façon extrêmement sensible le passage d'une onde électromagnétique. Ce nouvel effet, rapidement appelé « Effet Branly », ouvre la possibilité de transmettre des messages à distance sans aucun lien matériel entre l'émetteur et le récepteur. Le 12 janvier 1891, Branly fait une nouvelle communication à l'Académie où il note l'amélioration de l'efficacité du dispositif lorsque celui-ci est relié à une ou deux tiges métalliques qui font office d'antenne (le terme apparaîtra plus tard). L'un de ses futurs préparateurs, Gabriel Pelletier, note qu'il « *augmente ainsi la portée de sa transmission qui passa à près de 80 mètres, soit la distance entre son laboratoire et son récepteur placé dans le jardin des Carmes, de l'autre côté des bâtiments* ». Nous détaillerons dans le chapitre 4, le prodigieux développement qui a suivi la découverte de Branly. Il laisse, en effet, à d'autres le soin de développer les applications de sa découverte, la fameuse TSF : la Télécommunication Sans Fil. Tandis que dès l'année suivante, Oliver Lodge reprend le radioconducteur et y ajoute un système automatique de frappeur, Branly poursuit ses enseignements et se lance dans la rédaction d'un ouvrage didactique, son *Traité de*



*physique élémentaire*. Il poursuit également, avec la même ardeur, ses recherches. Les titres de ses publications dans les CRAS sont évocateurs : « Déperdition des deux électricités par les rayons très réfrangibles » (11 janvier 1892) ; « Nouvelle conductibilité unipolaire des gaz » (4 avril 1892) ; « Sur la conductibilité d'un gaz compris entre un métal froid et un corps incandescent » (27 juin 1892), etc. Tandis qu'Alexandre Popoff (ré)invente l'antenne en 1893, puis fait fonctionner – en mai 1895 – son appareil de TSF (constitué d'un éclateur de Hertz, d'un détecteur de Branly et d'une antenne), ce qui lui permet de transmettre un message en morse sur une distance de 250 m, Branly poursuit ses recherches sur la conduction des métaux. Ce dernier commentera ainsi les travaux de Popoff : « *La télégraphie sans fil résulte réellement des essais de Popoff. Le savant russe a développé une expérience que j'avais souvent réalisée et que j'ai reproduite en 1891 devant la Société des électriciens [l'actuelle SEE] : une étincelle inactive à une distance d'une dizaine de mètres devient active quand on la fait circuler dans une longue tige métallique [antenne]. De là, l'emploi des longs conducteurs annexés au transmetteur et au récepteur et sans lesquels il n'y a pas de télégraphie à grande distance.* »

## Une double vocation

---

En 1896, l'Institut Catholique est en proie à des difficultés de trésorerie. Branly indique lui-même : « *Les ressources de l'Institut Catholique ne couvraient plus les dépenses. Monseigneur d'Hulst m'avoua en janvier 1896 que la largeur du fossé n'allait plus permettre de le franchir. Une liquidation était proche, je me mis à songer à installer un cabinet de consultations* ». Le poste de professeur de Branly n'est toutefois pas menacé, le recteur lui exprime sa confiance dans un courrier daté d'août 1896 : « *... Mais nous garderions toujours l'équivalent, au moins, de l'ancienne École des Carmes, qui est une première nécessité pour le clergé. Dès lors, il nous faudra conserver quelques professeurs ou directeurs d'études. Notre affection, notre estime pour vous, nos obligations envers vous nous feraient alors un devoir de vous comprendre dans cette réserve intangible* ».

Pourtant, Branly est décidé à ouvrir un cabinet en ville. Il trouve sur la rive droite, rue Boursault, un petit appartement dans une maison modeste<sup>18</sup>. Ce trois pièces, situé au deuxième étage de l'immeuble, est vite transformé en cabinet médical : un salon d'attente, un bureau pour les consultations et une salle attenante pour les applications électriques, le tout sommairement meublé. Le choix de la rive droite peut surprendre mais il est très probablement lié au fait que ce quartier bénéficiait de l'électricité domestique, alors qu'elle était très peu

---

<sup>18</sup> Branly transférera son cabinet médical en 1913 dans une rue voisine, la rue Andrieux. Il y poursuivra ses consultations jusqu'en 1916.

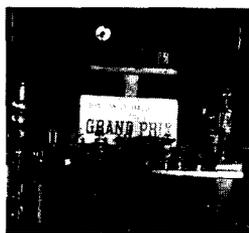
répandue rive gauche. Branly a en effet choisi de se spécialiser en électrothérapie (un choix qui ne peut pas surprendre), il soigne par cette technique les maladies nerveuses, les névralgies, les maladies des poumons et de l'estomac, la goutte, les rhumatismes, le diabète, etc. Il consulte quatre après-midi par semaine, mais il lui arrive également de faire des consultations à son domicile, avenue de Tourville.

C'est donc une triple vie que Branly mène de front : enseignant, chercheur et médecin ! Le rythme de ses communications à l'Académie des sciences ne faiblit pas pour autant. Il fait un parallèle entre la conductibilité électrique et la conduction nerveuse. Il expose ses idées dans un article publié par les CRAS du 27 décembre 1897 intitulé : « Conductibilité des radioconducteurs ou conductibilité électrique discontinue. Assimilation à la conductibilité nerveuse ». Il résume ainsi ses idées : « *Dès les premières recherches sur le fonctionnement du système nerveux, on a admis une ressemblance entre la conductibilité nerveuse et la conductibilité électrique ; on regardait alors les filets nerveux comme continus. Depuis, les recherches histologiques ont présenté le système nerveux comme formé d'éléments discontinus, appelés neurones, n'ayant que des rapports de contiguïté. L'assimilation du système nerveux à un ensemble de conducteurs métalliques n'est plus alors possible ; mais n'y a-t-il pas lieu de penser à une analogie avec un conducteur discontinu, un neurone jouant le rôle d'un grain métallique dans un conducteur discontinu ? Cet essai d'assimilation suggère des comparaisons qui offrent de l'intérêt. Nous voyons un choc affaiblir et même supprimer la conductibilité d'un conducteur discontinu ; de même un traumatisme peut déterminer l'anesthésie et la paralysie hystériques, dues à une suppression de la transmission, soit sensitive, soit motrice, de l'influx nerveux, peut-être par défaut de contiguïté des terminaisons nerveuses. Si des décharges électriques établissent la contiguïté des conducteurs discontinus, ne guérissent-elles pas dans certains cas l'anesthésie et la paralysie hystériques, en établissant la contiguïté des éléments ?* »

Pendant ce temps, la TSF se développe. En cette année 1897, Eugène Ducretet transmet un message sur une distance de 400 m entre son laboratoire et le Panthéon. L'année suivante, Branly écrit une communication sur la « *télégraphie sans fil et [les] collisions en mer* » (CRAS, 18 juillet 1898), tandis que Ducretet, avec l'aide cette fois de Branly, réalise, le 18 novembre 1898, une liaison entre la tour Eiffel et le Panthéon (4 km). Puis, c'est la première liaison transmanche. C'est le 28 mars 1899 exactement que Marconi transmet le premier message entre l'Angleterre (South Fireland) et la France (Wimereux). Ce premier message est adressé à Édouard Branly : « *M. Marconi envoie à M. Branly ses respectueux compliments pour la télégraphie sans fil à travers la Manche – STOP – Ce beau résultat étant dû en partie aux remarquables travaux de M. Branly – STOP* ». Vient ensuite l'incroyable : le 12 décembre 1901, Marconi réussit à établir une liaison transatlantique.



Branly, naturellement, est honoré pour ses travaux. En 1898, il reçoit sa première récompense. Elle vient de l'Académie des sciences qui lui décerne, en décembre, son prix Houllevigue. Joseph Bertrand, alors Secrétaire Perpétuel, écrit dans son rapport : « *L'application directe du tube à limaille à la construction du récepteur de la télégraphie hertzienne assure à leur auteur, dans l'histoire de l'électricité, une place que rien ne saurait lui enlever* ». En 1900 a lieu, à Paris, l'exposition universelle : avec 50 millions de visiteurs, elle bat tous les records. On y compte plus de 80 000 exposants et des attractions marquantes comme la projection sur de grands écrans des films des frères Lumière, un trottoir roulant, baptisé « rue de l'Avenir », et bien sûr, les nombreuses utilisations de l'électricité. Ce n'est que sur le petit stand de l'Institut Catholique que l'on peut voir le tube à limaille. N'empêche, Branly reçoit le grand prix de l'exposition universelle et est nommé chevalier de la Légion d'Honneur avec la mention suivante, parue au Journal Officiel : « *A découvert le principe de la télégraphie sans fil* ».



Grand prix de l'Exposition universelle reçu par Branly.

Pourtant, Branly n'étant pas homme à se reposer sur ses lauriers. Il perfectionne son dispositif et invente un détecteur encore plus sensible que le tube à limaille. Il s'agit du « radioconducteur à contact unique » qu'il présente le 10 février 1902 à l'Académie et que l'on connaît sous le nom plus simple de « trépied ». Il le décrit ainsi : « *Trois tiges métalliques de même nature, parallèles et verticales, de 2 mm de diamètre environ, sont réunies à leur partie supérieure par un disque qui les relie à l'un des pôles, les extrémités inférieures des tiges [sont] polies et oxydées, [elles] reposent librement sur un plan d'acier poli, relié au second pôle. On a ainsi trois contacts semblables qui peuvent se suppléer* ». Ce trépied lui permet de faire « un récepteur de télégraphie sans fil » qu'il présente dans une nouvelle communication à l'Académie, le 26 mai 1902. La même année, Branly s'associe à un industriel, M. Popp, pour breveter son nouveau détecteur et pour l'exploiter. Popp crée une compagnie, la « Société Française des Télégraphes sans fils », et plusieurs ministres encouragent cette initiative. Une station émettrice est construite, mais, contre toute attente, le gouvernement français ne donne pas l'autorisation d'émettre. Popp est condamné pour avoir violé le monopole d'État des communications, et sa société fait faillite.

C'est également en 1902 que Branly est élu membre correspondant de l'Académie Pontificale des sciences. Cette Académie n'est autre que la célèbre *Accademia dei Lincei* (Académie des Lynx), fondée en 1603 par Federigo Cesi, Marchese di Monticelli et dont Galilée fut, à partir de 1611, un membre éminent. En 1903, Édouard Branly partage avec Pierre Curie le Prix Osiris. Ce prix triennal, décerné par l'une des cinq Académies de l'Institut de France, est destiné à récompenser « *la découverte ou l'œuvre la plus remarquable dans les sciences, les lettres, les arts,*

*l'industrie et, généralement, dans tout ce qui touche à l'intérêt public* ». Parmi les récipiendaires de ce prix, on compte Louis Blériot, le docteur Roux et le Maréchal Lyautey. Ce prix avait été institué par un riche mécène, qui avait fait fortune dans la finance, Daniel Iffla qui se faisait appeler Osiris. C'est également l'époque où Branly rencontre la comtesse Greffulhe. Cette grande dame, Élisabeth de Caraman-Chimay, est la fille du prince Joseph de Chimay, ministre des Affaires étrangères de Belgique. Elle devient comtesse Greffulhe en épousant en 1878 le comte Henri Greffulhe. Intelligente, sage, originale, cultivée et riche, elle se distingue par son charisme et sa beauté. Elle a inspiré à Marcel Proust sa comtesse de Guermantes. Son salon, situé 10 rue d'Astorg, attire le gratin parisien des arts, des sciences et de la politique. On y rencontre Franz Liszt, Anna de Noailles, Edmond de Goncourt, Paul Claudel, François Mauriac, Edmond Rostand, André Maurois, Henri Bergson, Marcellin Berthelot, Irène Joliot-Curie, Maurice et Louis de Broglie, Casimir Perier, Paul Deschanel, pour n'en citer que quelques-uns. La correspondance entre la comtesse Greffulhe et Édouard Branly commencera en 1904 et se prolongera jusqu'à sa mort, en 1940. Elle s'intéresse à ses travaux, l'encourage et le fait connaître.



La comtesse Greffulhe.

## Paris émerveillé

---

Au début de l'année 1905, la comtesse Greffulhe demande à Branly de faire ses expériences dans son château de Bois-Boudran devant un public choisi. Branly travaille alors sur la télé mécanique, véritable ancêtre de la télécommande. Il avait commencé ses travaux dans ce domaine dès 1898 et poursuivait depuis lors l'amélioration de ses dispositifs que l'on qualifierait aujourd'hui de télécommande. Branly publie, à son habitude, son travail dans une communication au CRAS (20 mars 1905) intitulée : « Distribution et contrôle d'actions produites à distance par les ondes électriques ». Le 22 juin 1905, il donne à l'Institut Catholique une conférence sur la télé mécanique et fait une démonstration expérimentale de son dispositif. *« Des étincelles, dit Branly lors de cette conférence, que l'on fait éclater l'une après l'autre au poste de départ s'adresseront successivement aux différents circuits. On réalisera ainsi, en somme, les variantes intéressantes de l'expérience fondamentale, appliquées à divers effets. J'ai démontré ces divers effets ici même dans ma conférence de 1898. Si les circuits des différents phénomènes avaient tous été formés à l'avance, simultanément, au poste d'arrivée, chacun avec son tube à limailles, une même étincelle aurait exercé son effet sur tous les circuits à la fois et réalisé d'un seul coup toutes les actions. Par suite de nouvelles études, je vais démontrer qu'un opérateur placé à un poste de départ, peut agir sur un poste d'arrivée où la présence d'une personne n'est plus nécessaire, une fois les*

*dispositifs agencés naturellement. L'opérateur peut alors, du poste de départ, produire successivement les phénomènes préparés au poste d'arrivée, et ce, dans un ordre dont il reste constamment le maître, il peut laisser les phénomènes produits persister durant un temps variable à son gré, les suspendre ensuite dans un nouvel ordre qui sera différent du premier s'il le désire. Le poste d'arrivée peut ne pas voir le poste de départ, il peut en être éloigné de plusieurs kilomètres, voire même de plusieurs dizaines ou centaines. L'opérateur sait qu'il peut agir au moment utile et provoquer tel ou tel effet avec sûreté. »*

### **La télé mécanique, ancêtre de la télécommande**

*C'est le 26 mars 1898 qu'Édouard Branly présente pour la première fois la Télé mécanique sans fil au cours d'une réunion à l'Institut Catholique. « Je n'ai pas l'intention, dit Branly, de développer aujourd'hui, dans une conférence méthodique, la question de la télégraphie sans fil et de la télé mécanique sans fil. Je me propose de vous présenter simplement mes expériences personnelles [...] Ma seconde expérience est la première application qui a été faite du tube à limailles, pour des expériences de commande de mécanique à distance, par l'effet d'étincelles : incandescence de fils métalliques ou de lampes électriques, illumination de corps combustibles, explosion de mines ou de pièces d'artifices, actions mécaniques variées telles que le forage de pièces métalliques, élévation ou substantiation de fardeaux par électroaimants. Rien n'empêche d'effectuer, l'un après l'autre, ces différents effets au poste d'arrivée, si l'opérateur introduit un tube à limailles successivement dans les circuits qui leur correspondent. Des étincelles que l'on fait éclater l'une après l'autre au poste de départ s'adresseront successivement aux divers circuits à mettre en fonctionnement. Si tous les circuits des divers appareils présentés, en l'état actuel des expériences, avaient été pourvus, au poste d'arrivée, d'un tube à limailles, une même étincelle exercerait son effet sur tous les circuits à la fois et réaliserait d'un seul coup l'action et toutes les actions. Voici un fil de platine d'un mètre de longueur. Il va devenir incandescent sur la commande de l'étincelle de l'appareil de départ. Voici un électro-aimant qui va se mettre en fonctionnement et attirer et maintenir dans le vide un boulet de douze kilogrammes. Voici des tubes de Geissler qui vont s'illuminer, un moteur électrique qui va tourner. Voici enfin, une pièce d'artillerie qui explosera lorsque son dispositif aura été complété par le tube à limailles qui lui manque actuellement [...] Ici, c'est de la télé mécanique sans fils, les effets de l'étincelle au départ, le radioconducteur à l'arrivée permettent d'accroître presque indéfiniment la distance de commande, sans rien perdre de la sûreté et de la précision dans les commandes. »*

De façon tout à fait indépendante, Nikola Tesla fait, en mai 1899, une démonstration impressionnante de « télé-automatique » devant

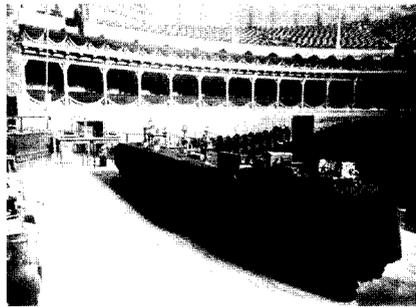
les membres du Club de commerce de Chicago. Tesla, le père du courant alternatif, est passé maître dans l'art de la mise en scène. Ce jour-là, pour présenter son nouveau dispositif, il fait installer au centre de la grande salle un petit lac artificiel. Du bord du lac, il manipule un appareillage qui envoie des ordres au bateau par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Il invite les membres de l'auditoire à lui proposer des manœuvres qu'il exécute grâce à son transmetteur sans fil. Contrairement à Branly, Tesla utilise comme récepteur une simple boucle de Hertz, ce qui limite la portée de la « télécommande ».

De son côté, Branly perfectionne son dispositif. Il revient sur la question en 1900 : *« Le retard apporté à la vulgarisation de la télé mécanique sans fil est lié à des nécessités de sécurité qui ont pour elle une importance exceptionnelle. Il est évident que l'intervention d'étincelles étrangères, souvent peu graves à propos de transmission de signaux, risque de devenir extrêmement dangereuse, voire même périlleuse, pour certains effets commandés. »* Ces problèmes seront définitivement contournés lors des expériences de Branly de 1905.

La comtesse Greffulhe souhaite faire connaître au tout-Paris la nouvelle invention de Branly et a l'idée d'organiser au Trocadéro, le 30 juin 1905, avec le directeur du journal *Le Matin*, Bunau-Varilla, une démonstration publique d'expériences de télé mécanique. Branly prépare avec soin cet événement, ce qui ne l'empêche pas de publier, quatre jours seulement avant la séance publique, une nouvelle communication à l'Académie intitulée : « Appareil de télé mécanique sans fil ». La démonstration est faite le 30 juin dans la grande salle des fêtes du Trocadéro. Des milliers de personnes se disputent l'une des 5000 places que peut contenir la salle. Il y a là les plus hautes autorités de l'État, les corps constitués, les ambassadeurs, le haut commandement militaire ainsi que le peuple des faubourgs. Albert de Lapparent, le collègue de Branly à l'Institut Catholique, nous dépeint de façon précise et vivante la démonstration du Trocadéro :

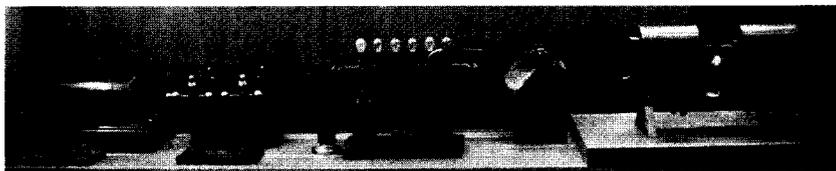
*« La conférence, faite avec l'admirable lucidité qui le distingue, et dont le prix est doublé par une simplicité de langage où la droiture de l'homme éclate non moins que la supériorité du savant, a produit une profonde impression. Essayons de décrire les expériences qui ont enthousiasmé le public du Trocadéro, et qui, à un autre âge, eussent sûrement fait accuser de sorcellerie celui qui les avait conçues. Imaginons deux stations, une de départ, l'autre d'arrivée, en communication par la télégraphie sans fil, à l'aide des appareils à antennes que la pratique a définitivement consacrés. À la station d'arrivée, se trouvent plusieurs mécanismes qu'il s'agit d'actionner à distance. Dans les*

Le grand  
amphithéâtre du  
Trocadéro où se sont  
déroulées les  
expériences de  
télémechaniques.



*expériences de M. Branly, ces appareils étaient : 1° un groupe de lampes électriques, qu'on devait allumer ou éteindre ; 2° un ventilateur à ailettes, pouvant tourner sous les regards de l'assemblée ; 3° un électro-aimant, soulevant, lorsqu'il était en action, un boulet de canon, qu'il laissait retomber, quand l'animation cessait, avec un bruit facile à entendre ; 4° un pistolet chargé, faisant feu au commandement. Pour mettre ces instruments en action, la station d'arrivée dispose d'un appareil spécial, dont la majeure partie est enfermée dans une grande boîte carrée, à parois de grillage métallique, de sorte qu'on pourrait, si ce n'était pas irrévérencieux, la comparer à un garde-manger. Dans cette boîte sont contenus les instruments, notamment les radioconducteurs, qui doivent recevoir et utiliser l'impulsion partie de la station de départ. La pièce principale de la boîte est un appareil moteur, capable de faire tourner un arbre en bois..., long d'une vingtaine de centimètres, portant cinq garnitures métalliques, isolées les unes des autres, et dont chacune forme une jante circulaire, présentant sur la cinquième partie de sa circonférence, une protubérance marquée... Les choses sont disposées de telle sorte que, quand le moteur électrique fonctionne, le télégraphe automatique sans fil envoie immédiatement, à la station de départ, une dépêche qui s'inscrit sur un rouleau de papier, comme dans l'appareil morse, utilisé par la télégraphie ordinaire... Mais il faut que l'opérateur soit averti du succès de sa mise en action. Pour cela, M. Branly a combiné les choses de telle façon que, aussitôt l'appareil numéro deux en marche, par exemple, un trait particulier, de la plus grande longueur, vient se dessiner à côté des deux traits de la dépêche, laquelle se transforme ainsi en dépêche de contrôle. Cet appareil qu'il ne voit pas, dont cent kilomètres et plus peut-être le séparent, l'opérateur sait maintenant qu'il a obéi à son action. Et il peut l'arrêter tout comme il l'a mis en marche... »*

Le succès retentissant de cette manifestation va assurer définitivement la célébrité de Branly. C'était bien le but poursuivi par la comtesse Greffulhe, elle écrit le 9 juillet 1905 : « J'ai eu la joie de pouvoir mettre en valeur M. Branly, l'inventeur, et de faire connaître ses expériences



*qui étaient totalement inconnues car il est la modestie même. Aussi, est-il tout étonné de voir son nom acclamé et des lettres lui parvenir de tout l'Univers. L'idée même de l'accord des substances à travers l'espace n'est-elle pas incomparablement belle ? »*

### **L'expérience de télémechanique du 30 juin 1905, au Trocadéro**

Dans ses expériences du Trocadéro, Branly montre qu'il est possible, sans aucun lien matériel, de déclencher des actions à distance et de recevoir, en retour, les comptes-rendus de leur exécution. Il peut à volonté et dans un ordre quelconque : mettre en marche ou arrêter un ventilateur ; allumer ou éteindre une rampe d'ampoules électrique ; faire soulever un gros boulet de canon par un électro-aimant, ou le laisser retomber ; faire tirer un pistolet, etc.

Le dispositif de Branly est constitué d'un poste de commandement et d'un poste récepteur. Au poste récepteur se trouve, une roue crantée, qui tourne en synchronisme avec une roue semblable située au poste de commandement, et qui découpe le temps en autant d'intervalles qu'il y a d'actions à commander. Dans chaque intervalle, le poste récepteur envoie un message formé de traits et de points, comme le code Morse, pour indiquer l'état de l'action correspondante (en marche ou à l'arrêt) ; puis le poste se met en réception pendant plusieurs secondes. Lorsqu'il reçoit une onde émise par le poste de commandement, il permute l'état de l'action, d' « arrêt » sur « marche », ou de « marche » sur « arrêt ».

Cependant, le succès ne monte pas à la tête de notre physicien. Il poursuit ses recherches, son enseignement et ses consultations médicales. Le chemin toutefois continue à être parsemé d'embûches. En 1909, le bail de l'Institut Catholique vient à expiration. Or l'Institut Catholique qui était locataire de l'Archevêché est, depuis la séparation en 1905, de l'Église et de l'État, locataire de l'État. Le bail sera-t-il renouvelé ? Branly fait part de son inquiétude à la comtesse Greffulhe. Il craint de devoir quitter son laboratoire « *au moment où après beaucoup de peine, [il] commence à être bien outillé* ». La comtesse en parle à

Alexandre Millerand<sup>19</sup>, qui vient d'être nommé ministre, et l'invite à visiter le laboratoire de Branly pour que ce dernier lui présente ses recherches. Millerand effectue la visite, il écrit lui-même : « *J'en suis sorti émerveillé. Ou je m'abuse, ou ce que nous avons vu n'est rien au prix de ce que nous réserve la suite des applications qui seront dues au génie de M. Branly. L'homme est d'ailleurs aussi sympathique que le savant est admirable. Je lui ai dit combien je vous suis reconnaissant de m'avoir permis de constater de mes yeux ces merveilles* ». Finalement le bail est signé. Branly remercie la comtesse en ces termes : « *Mes remerciements les plus sincères pour un résultat qui me touche tant et que seule votre diplomatie a rendu possible. Si les arts vous doivent beaucoup, la science et les savants ne peuvent oublier le sympathique intérêt que vous leur portez* ».

## Le prix Nobel... de Marconi et Braun

---

Dès 1904, Édouard Branly est proposé pour le Nobel, en particulier le rapport de F. Sundell au comité Nobel indique : « [...] *J'ai l'honneur de proposer le professeur Branly pour au moins une partie du prix Nobel de physique de cette année dans le cas où le Comité déciderait de décerner le prix aux scientifiques qui ont donné à la TSF le niveau qualitatif qui est le sien aujourd'hui* ». Mais le prix de physique 1904 sera attribué à Lord Rayleigh, tandis que celui de chimie le sera à Ramsay pour la ... même découverte ! (la découverte de l'argon), fait unique dans les annales du Nobel<sup>20</sup>. En 1909, Édouard Branly est de nouveau proposé pour le Nobel de physique. Tallqvist écrit dans son rapport : « ... *J'ai l'honneur de proposer que le Prix Nobel de physique soit décerné en trois parts égales à E. Branly, G. Marconi, W. Poulsen* », mais aucun des quatre français ayant donné leur avis pour le Nobel 1909 (G. Lippmann, G. Darboux, P. Painlevé, H. Poincaré) ne proposa Édouard Branly. En 1909, le Prix Nobel de physique est attribué à Marconi et à Braun « *En reconnaissance de leurs contributions au développement de la télégraphie sans fil* ». Il semble que, initialement, c'est à Marconi et Branly qu'était destiné le Prix. On a souvent considéré que la non attribution du prix Nobel de physique

---

<sup>19</sup> Alexandre Millerand (1859-1943) est ministre du Commerce et de l'Industrie entre 1899 et 1902. Il devient ministre des Travaux publics de 1909 à 1910 ; ministre de la Guerre en 1912 et 1913 puis de 1914 à 1915 ; Président du Conseil en 1920 et Président de la République de 1920 à 1924.

<sup>20</sup> Les citations Nobel sont rédigées ainsi : le prix Nobel de physique est attribué à Lord Rayleigh « *Pour ses études sur la détermination de la densité des plus importants des gaz et pour sa découverte de l'argon* », le prix Nobel de chimie est attribué à Ramsay « *En reconnaissance de ses services dans la découverte des éléments gazeux inertes de l'air et la détermination de leur place dans le tableau périodique des éléments* ».

de 1909 venait du « *veto des membres de l'Institut, d'anciens condisciples de Normale, qu'il tutoie* ». C'est oublier qu'en 1909, le mathématicien Mittag-Leffler fait une campagne énergique pour l'attribution du prix à son ami Henri Poincaré (Poincaré a d'ailleurs déjà été proposé pour le prix en 1904, 1906 et 1907). Mittag-Leffler obtient de nombreuses signatures, dont, côté français, celles de Andoyer, Appell, Boussinesq, Brillouin, Marie Curie, Darboux, Duhem, Painlevé (on notera également celle de Marconi). Par ailleurs, pour faire diversion, Mittag-Leffler fait officiellement campagne pour les frères Wright (Wilbur et Orville) qui, avec le développement « du plus lourd que l'air » ont fait entrer l'humanité – le 17 décembre 1903 – dans l'ère de l'aviation. Mittag-Leffler écrit : « *Nous avons signé avec Poincaré et vous [notre proposition] du plus lourd que l'air* ». Parmi les quatre français qui ont donné leur avis pour le Nobel 1909, trois sont mathématiciens, suivant les conseils de Mittag-Leffler, Poincaré et Painlevé ont proposé le prix pour les frères Wright tandis que Darboux et Lippmann ont soutenu Poincaré. Notons que dans son rapport le comité Nobel commente les propositions en faveur de Poincaré et de l'aviation. Concernant Poincaré, il est indiqué que « [bien que] *la proposition qui a été faite soit indubitablement digne de toute attention [...] le comité ne pense pas, pour le moment, devoir lui accorder la priorité.* » Quant au plus lourd que l'air, le rapport considère que la proposition en faveur de l'aviation ne peut pas être retenue car « *cette découverte, dans son état actuel, ne peut guère présenter, pour l'humanité, l'utilité envisagée par les statuts de la Fondation Nobel* » (!) Édouard Branly est de nouveau proposé en 1915 pour le Nobel, mais de nouveau sans succès.

## L'Académie : Édouard Branly ou Marie Curie

---

Le 1<sup>er</sup> novembre 1910, l'Académie des sciences annonce la mort du physicien Désiré Gernez, qui avait été élu le 25 juin 1906 au siège qu'avait occupé Pierre Curie. Les collègues et amis de Marie Curie l'encourage à poser sa candidature à la place laissée vacante. Rien, en effet, dans le règlement de l'Institut n'exclut les femmes. Dès ce mois de novembre 1910, certains académiciens voient en Édouard Branly un candidat potentiel à la mesure de l'élection qui s'annonce. Branly avait auparavant été deux fois candidat malheureux. La première fois, en novembre 1908, contre Edmond Bouty et la seconde, en décembre 1908, contre le chimiste Paul Villard, découvreur en 1900 du rayonnement gamma. Analysons les circonstances de cette élection.

Après le prix Nobel reçu en 1903 « *En reconnaissance des services extraordinaires qu'ils ont rendus par leur recherche conjointe sur le phénomène de radiation découvert par le professeur Henri Becquerel* », Pierre et Marie Curie poursuivent leurs travaux sur la radioactivité en général et sur le radium en particulier. Le 3 juillet 1905, Pierre Curie entre à l'Institut, il écrit à Georges Gouy : « *Je me trouve être à l'Académie sans l'avoir désiré et sans que l'Académie ait désiré m'avoir* ». Moins d'un an plus tard, c'est le drame : « *Le 19 avril 1906, indique Marie Curie, il assistait à la réunion de l'Association des Professeurs des Facultés des Sciences, avec lesquels il s'entretenait très cordialement des buts que pouvait se proposer l'association. En sortant de cette réunion, à la traversée de la rue Dauphine, il ne put éviter un camion qui venait du Pont-Neuf, et tomba sous les roues. La contusion à la tête fût instantanément mortelle et ainsi fût détruite l'espérance que l'on pouvait fonder sur l'être merveilleux qui venait de disparaître* ». Le 13 mai 1906, le Conseil de la Faculté des Sciences décide de maintenir la chaire de Pierre Curie et d'attribuer à Marie la charge de son enseignement. Marie Curie devient la première femme professeur à la Sorbonne. En 1910, peu avant sa candidature à l'Académie des sciences, elle publie un « traité de la radioactivité ». À cette époque, Marie Curie est membre étranger de cinq Académies, membre de très nombreuses sociétés savantes et a reçu onze prix, dont le plus prestigieux, le prix Nobel. Toutefois, elle ne tient pas particulièrement à devenir membre de l'Académie des sciences de Paris, sans doute se souvient-elle des commentaires de son mari lorsqu'elle écrit à Georges Gouy en novembre 1910 : « *Je ne tiens pas particulièrement à être de l'Institut, je tiens encore bien moins à me faire refuser par une institution qui ne me séduit en aucune façon* ». Dans la même lettre, elle fait part de sa crainte : « *Je me méfie d'ailleurs beaucoup de M. Branly, car il sera soutenu par les cléricaux qui sont très forts pour ce genre de combinaisons...* » Georges Gouy répond à Marie Curie, en parlant de ses craintes sur Branly : « *Il aura contre lui l'élément avancé et l'élément universitaire de l'Académie, qui ne lui pardonneront guère d'avoir abandonné la Sorbonne jadis pour la Faculté Catholique.* »

Un tournoi académique : une femme entrera-t-elle à l'Institut ?



Un autre élément essentiel intervient dans cette élection. Depuis sa création en 1666, aucune femme n'a été candidate à l'Académie des sciences et même, aucune femme n'a été admise dans l'une des cinq Académies qu'abrite l'Institut de France. Le journal *Le Matin* résume bien la situation dans un article du 15 novembre 1910 consacré à Marie Curie : « *Ses travaux ne lui ont créé que des admirateurs mais son sexe lui crée des adversaires* ».

Le 27 décembre 1910, la section physique de l'Académie des sciences se réunit pour choisir ses candidats. Marie Curie est présentée en première ligne. Le 4 janvier, la séance plénière de l'Institut déclare que « *consultée sur la question de l'éligibilité des femmes à l'Institut, [elle ne se reconnaît pas] le droit d'imposer sa décision aux diverses Académies prises individuellement* ». Fort de cette non décision, l'Académie des sciences peut poursuivre la préparation de l'élection. Lors de sa séance du 16 janvier, Gabriel Lippmann défend Marie Curie, Émile Amagat défend Daniel Berthelot, Louis Violle défend Édouard Branly, Paul Villard défend André Broca, Edmond Bouty défend Aimé Cotton ! Par ailleurs, sur une suggestion d'Henri Poincaré, le nom de Marcel Brillouin est ajouté (Marcel Brillouin n'habitait pas Paris son éligibilité n'allait pas de soi, du reste il n'était pas candidat). La presse s'empare de cette élection, les passions se déchaînent : d'un côté, les anticléricaux tirent à boulets rouge contre Branly. De l'autre, les misogynes et les xénophobes traînent Marie Curie dans la poussière. Seul le quotidien *Gil Blas* reste, dans cette querelle indigne, au-dessus de la mêlée. On peut y lire le 23 janvier, jour de l'élection, « *Il est aussi faux de soutenir que M<sup>me</sup> Curie n'a rien fait en dehors de son mari que de dire que le Dr. Branly est étranger à la découverte de la radio* »<sup>21</sup>. En ce jour de vote, le service d'ordre a été renforcé à l'Académie des sciences. Il faut dire qu'en cet après-midi d'élection une foule inhabituelle de curieux s'amasse aux portes de l'Institut. D'emblée, le ton est donné : le président, Armand Gautier, dit aux huissiers en ouvrant la séance : « *Laissez entrer tout le monde, les femmes exceptées* ». Le scrutin compte cinquante-huit votants. Au premier tour, Édouard Branly recueille vingt-neuf voix, Marie Curie vingt-huit et Marcel Brillouin une voix. Une voix manque pour Branly et le second tour s'annonce indécis. Finalement, Édouard Branly est élu avec trente voix, contre vingt-huit pour Marie Curie.



Branly académicien.

<sup>21</sup> Signalons que quelques mois plus tard, toujours en 1911, la presse à sensation étale la liaison existant entre Marie Curie et Paul Langevin. Le scandale retombe à l'annonce de l'attribution à Marie Curie d'un deuxième prix Nobel, de chimie cette fois, « *en reconnaissance de la part active qu'elle a prise dans le développement de la chimie par la découverte des éléments, le radium et le polonium, par la détermination des propriétés du radium et par l'isolement à l'état métallique du radium, enfin, par ses expériences au sujet de cet élément remarquable* » (Marie Curie est la seule femme à avoir reçu deux prix Nobel).

Il ne faudrait pas conclure de cette élection médiatisée à une opposition entre les deux savants. Branly dira lors d'une interview au journal gaulois : « *J'ai moi-même une grande admiration pour M<sup>me</sup> Curie* ». Rappelons, par ailleurs, qu'il avait obtenu conjointement avec Pierre Curie le prix Osiris de cette Académie qui lui ouvrait ses portes. Gabriel Lippmann, alors vice-président de l'Académie des sciences dira : « *Des agitations inutiles ont transformé en débat public une question purement scientifique. On a accusé à tort les amis du remarquable professeur qu'est M<sup>me</sup> Curie, dont la modestie et le désintéressement sont absolus. Et une gêne véritable a pesé sur cette élection, je le déplore sincèrement. Mais les titres de M. Branly, assurément éminents, n'en sont pas moins reconnus de nous tous. Nous nous réjouissons de cet hommage à la science qu'il représente et comptons simplement qu'à la prochaine vacance M<sup>me</sup> Curie triomphera, cette fois sans polémique, en vertu de son seul et grand mérite* ». Mais Marie Curie ne se représentera jamais à l'Académie des sciences. Elle est toutefois élue en 1922 (mais sans avoir fait campagne) membre de l'Académie de médecine. Ce n'est qu'en 1962, que Marguerite Perey sera admise membre correspondant de l'Académie des sciences. Ironie de l'histoire ou reconnaissance tardive, Marguerite Perey a fait ses débuts dans le laboratoire de Marie Curie et a découvert en 1939 un nouvel élément, le francium. La première femme à devenir membre à part entière de l'Académie des sciences est Yvonne Choquet-Bruhat<sup>22</sup> en ...1979. L'Académie des sciences

### Le jugement de Marie Curie

Marie Curie, dans son autobiographie, relate les circonstances de sa candidature : « *Plusieurs de mes collègues me persuadèrent d'être candidate pour l'élection à l'Académie des sciences de Paris à laquelle mon mari appartenait durant les derniers mois de sa vie. J'hésitais beaucoup car cela imposait, suivant l'usage, de faire un grand nombre de visites aux membres de l'Académie. Cependant j'acceptais finalement de me porter candidate à cause des avantages que pourraient avoir mon élection pour mon laboratoire. Ma candidature provoqua un vif intérêt dans le public, essentiellement parce que cela soulevait le problème de l'élection des femmes à l'Académie. Beaucoup d'académiciens y étaient opposés par principe et lorsque le scrutin arriva, j'avais moins de voix qu'il était nécessaire. Je ne souhaitais même plus renouveler ma candidature à cause de mon fort dégoût pour les sollicitations personnelles que cela impose. Je crois que de telles élections devraient être fondées entièrement sur une décision spontanée, sans l'implication d'aucun effort personnel, comme c'était le cas pour de nombreuses Académies et Sociétés qui me nommèrent membre sans la moindre demande ou initiative de ma part* ».

<sup>22</sup> Yvonne Choquet-Bruhat est une mathématicienne internationalement reconnue. On lui doit de nouvelles formulations de la relativité générale d'Einstein. Elle a reçu en 2004 le « Marcel Grossmann Award », du nom de Marcel Grossmann, ami et collègue d'Einstein qui donna la structure mathématique à la théorie d'Einstein.

est néanmoins la première Académie à admettre en son sein une femme. Elle allait être suivie, l'année d'après, par l'Académie française qui accueille, en 1980, Marguerite Yourcenar dans son hémicycle.

## Un nouveau laboratoire

---

Branly est nommé doyen de la Faculté des sciences de l'Institut Catholique. Nous sommes en 1914, la guerre éclate. Branly continue ses cours et ses recherches dans son laboratoire qui se transforme en glacière l'hiver. En juillet 1915, il réalise « un nouveau procédé de télégraphie optique », ce nouveau procédé utilise l'infrarouge et l'on réussit à transmettre ainsi des signaux sur une distance de 20 kilomètres.

Une anecdote montre bien la grande popularité de Branly. Le périodique *Science et Voyages* organise, en 1920, un concours auprès de ses abonnés en leur demandant quels étaient les cinq plus grands savants et les cinq plus grandes découvertes contemporaines. Branly et la TSF arrivèrent largement en tête. Branly était le premier des cinq plus grands savants devant M. Roux (de l'Institut Pasteur), H. Vincent (du Val-de-Grâce), D. Berthelot (célèbre chimiste de l'École de Pharmacie) et A. Carrel (prix Nobel de médecine 1912). La TSF précédait d'autres grandes découvertes comme l'avion, les rayons X, la vaccination contre la fièvre typhoïde et la découverte du radium. Mais ce dont Branly a besoin, bien plus que de gloire, c'est d'un laboratoire. À partir des années 1920, plusieurs souscriptions sont lancées pour doter Branly d'un laboratoire digne de ce nom, mais sans succès. Elles permettent toutefois de recueillir des fonds bien utiles au fonctionnement du laboratoire. En 1921, c'est le journal *L'Echo de Paris* qui lance une souscription. La comtesse Greffulhe écrit à Branly : « *Ma pensée de toujours s'est réalisée en une souscription nationale en votre honneur, j'envoie ma modeste contribution à L'Echo de Paris* ». Les principaux donateurs sont les frères Rothschild, Alexandre Millerand – alors Président de la République – et la banque de France. D'autres soutiens arriveront entre 1921 et 1927, du Radio-Club de France, de la Société des amis de la TSF, du conseil municipal de Paris et d'autres. En 1923, Branly est nommé Commandeur de la Légion d'Honneur, mais n'a toujours pas le laboratoire de ses rêves.

Édouard Branly, membre de l'Académie Royale de Belgique depuis 1910, a l'habitude de se rendre une fois par an à Bruxelles à l'occasion d'une réunion de cette Académie<sup>23</sup>. Le Roi Albert et la Reine Élisabeth, qui ont toujours porté aux sciences un intérêt particulier, invitent à cette

<sup>23</sup> Branly était également membre de l'Académie pontificale des sciences et de l'Académie des sciences de Pologne.



Le nouveau laboratoire tant attendu.

occasion Branly et sa femme, soit au Palais, soit au château Laeken, le plus souvent avec la comtesse Greffulhe qui est dame d'honneur de la Reine. Le dimanche 24 avril 1927, les époux Branly quittent Paris en début d'après-midi pour rejoindre Bruxelles par le train. Ils arrivent un peu avant le dîner et s'installent dans une pension de famille. La soirée se passe bien, mais vers cinq heures du matin, Marie Branly se lève suite à un léger malaise qu'elle ressent et qu'elle attribue à une digestion difficile. Elle s'assoie dans un fauteuil, tandis qu'Édouard Branly, pensant à une indisposition légère se rendort. Au réveil, vers huit heures du matin, il trouve sa femme dans la même position que trois heures plus tôt et doit faire face à la terrible réalité : sa femme est morte ! À quatre-vingt deux ans, il se retrouve seul, loin de chez lui, désespéré. La reine Élisabeth vient elle-même lui présenter ses condoléances et lui apporter un peu de soutien dans cette terrible épreuve. On imagine la tristesse infini du vieux savant lorsqu'il rentra chez lui et franchit le seuil de son appartement où plus rien ne serait comme avant. Il décide néanmoins de rester dans ce grand appartement, seul au milieu de ces souvenirs. Quelques mois plus tard, sous le poids de la solitude, il renonce à vivre seul et s'installe chez sa fille cadette Élisabeth et son gendre Paul, boulevard du Montparnasse, non loin de l'Institut Catholique. Mais avec leur deux filles, Florence et Marion, l'appartement se révèle vite inadapté et le couple déménage pour s'installer dans un appartement au 87 boulevard Saint-Michel, presque en face de l'École des Mines. Édouard Branly y a sa pièce et se recrée un petit univers avec les meubles qu'il a toujours possédés. En traversant le jardin du Luxembourg, il peut rejoindre à pied son cher laboratoire.

### **Le couple royal belge et Einstein**

C'est le lundi 20 mai 1929 qu'Einstein fait la connaissance de la reine Élisabeth de Belgique. La reine est une artiste aux idées libérales. Einstein arrive avec son violon et la reine joue avec lui, puis ils prennent le thé sous les marronniers, font une ballade dans le parc et dînent en toute simplicité. Quelques jours plus tard, elle écrit à Einstein : *« Ce fut pour moi un moment inoubliable de vous voir descendre des sommets de vos connaissances pour me donner un aperçu de votre ingénieuse théorie »*. Le roi Albert (en visite en Suisse ce 20 mai) s'intéresse également aux arts et aux sciences. Par la suite, les Einstein seront reçus de nombreuses fois par le couple royal dans leur château de Laeken. En 1933, ils trouveront un temps refuge en Belgique au Coq sur mer. Einstein, menacé de mort, est protégé par deux gardes du corps. Le roi Albert lui écrira, en juillet 1933 : *« Nous sommes très heureux que vous vous soyez établi sur notre sol. Il y a des hommes qui, par leurs travaux et leur envergure intellectuelle, appartiennent à l'humanité plutôt qu'à un pays et pourtant le pays qu'ils choisissent comme asile en tire une grande fierté. »*

En 1928, Branly écrit à son fils : « *Je travaillerais sans difficulté d'une façon avantageuse si les conditions inimaginables dans lesquelles se trouve mon laboratoire permettaient d'y réaliser des expériences profitables...* » Le recteur de l'Institut Catholique, Monseigneur Baudrillart, qui avait en 1916 prit l'engagement de laisser à Branly (qui a alors 72 ans) la jouissance de son laboratoire sa vie durant, lui rappela en 1930 que s'il était resté à la Sorbonne il serait depuis longtemps à la retraite et ajoutait « *Mieux vaut tout de même avoir un laboratoire imparfait que pas de laboratoire du tout* ».

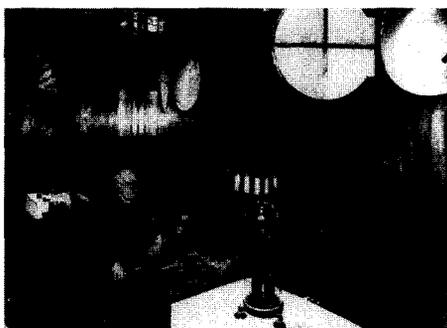
Depuis le début des années 1920, comme nous l'avons vu plus haut, des souscriptions sont lancées pour offrir à Branly le laboratoire dont il a tant besoin, mais elles se révèlent toujours insuffisantes. Au début 1929, Branly est contacté par Pierre Jacques<sup>24</sup> qui se propose de réunir des fonds pour la construction du futur laboratoire. Branly, dans son invitation à lui faire visiter ses locaux actuels lui écrit : « *Si vous pouviez passer prochainement au laboratoire, je serais bien aise de vous parler de mes travaux. Je pourrais en effet vous montrer mes grandes difficultés d'expériences par les tremblements du sol* ». C'est un point sur lequel Branly a insisté de nombreuses fois : la proximité de son laboratoire avec la rue de Vaugirard très passante engendrait des vibrations qui gênaient terriblement ses expériences si délicates, il parlait de son « *laboratoire branlant* ». Pierre Jacques publie dans l'*Ami du Peuple* un reportage sur les conditions de travail de Branly et demande peu de temps après des renseignements techniques plus précis à notre savant, lequel lui répond : « *Dans mon laboratoire qui se trouve privé de tout personnel et dont le matériel est insuffisant, je ne puis faire aucune expérience qui me permette de répondre à vos questions. La sympathie que m'a toujours montrée l'Ami du peuple et vous-même, me fait regretter de n'être pas en mesure de vous renseigner* ». Pierre Jacques a l'idée de parler du projet à son patron.

François Coty naît à Ajaccio, devient un parfumeur célèbre et fait fortune. Personnage complexe et multiple, il écrivait sur sa carte de visite : « *François Coty, artiste, industriel, technicien, économiste, financier, sociologue* ». En 1922, il achète *Le Figaro*, qu'il laisse en 1928 au profit de l'*Ami du peuple*. Ami des arts, des sciences et des techniques, François Coty fait œuvre de mécénat : il a financé de nombreuses expositions ainsi que la traversée de l'atlantique en avion par Costes et Bellonte. En juillet 1929, Pierre Jacques profite d'une invitation de François Coty dans son château de Louvecienne pour l'entretenir du besoin de Branly de disposer d'un laboratoire digne de ce nom. Coty accepte volontiers de venir en aide au grand savant. Il lui écrit en décembre 1929 la note

<sup>24</sup> Pierre Jacques est le collaborateur de François Coty à l'*Ami du peuple*.

suivante : « En mettant sous ce pli la contribution qui vous est destinée, je ne fais que me libérer un peu de l'immense dette que le monde entier se sent envers vous ». L'emplacement du nouveau laboratoire doit tout naturellement se situer dans l'Institut Catholique de Paris dont les murs étaient les témoins de la plupart des travaux scientifiques du physicien. Il est aussi entendu, aux termes des réserves faites par le donateur, que le laboratoire deviendrait à la mort du savant un Musée, et que d'emblée une des pièces principales serait aménagée avec des vitrines destinées à recevoir un grand nombre d'appareils conçus lors des découvertes. L'architecte Paul Tournon, gendre d'Édouard Branly, va être le concepteur et le réalisateur de ce laboratoire. Selon ses propres termes : « Un laboratoire est un être vivant dont le cerveau est le savant ; les divers fluides, le sang ; et les muscles, les moyens mécaniques mis à la disposition de l'expérience. L'architecte à qui incombe la redoutable charge de concevoir et de réaliser un laboratoire doit, sans négliger quoi que ce soit de sa construction et de ses installations, compter pour déterminante l'atmosphère qu'il y aura créée. C'est elle qui donnera au savant, à son insu sans doute, la joie de vivre, et facilitera son effort en le mettant dès la porte franchie, dans l'état de grâce d'un beau jour ». Dès le début du projet, Branly exprime son souhait de toujours : « Donnez-moi une petite pièce de travail et le moyen d'avoir des appareils assez stables pour que mon galvanomètre puisse me servir à quelque chose ». Paul Tournon, naturellement, prend en compte le souhait d'Édouard Branly et dispose quatre piliers fondés directement sur la roche à 12 m de profondeur et totalement indépendants du reste de la construction. Ces piliers supportent des tables de travail et leur confèrent une très grande stabilité. Branly souhaite également disposer d'une salle isolée électriquement et radioélectriquement. L'architecte imagine pour cela une salle de cuivre fermée hermétiquement par des hublots. Cette cage de Faraday dispose également de tables aux fondations spéciales. Paul Tournon achève de faire les plans du nouveau laboratoire en janvier 1931 et l'édification du bâtiment commence en 1932.

Branly dans la salle de cuivre de son nouveau laboratoire.



À quatre-vingt-sept ans, Édouard Branly peut enfin entrer en possession d'un beau laboratoire, qu'il attend depuis cinquante sept ans ! L'inauguration officielle a lieu à la mi-novembre 1932, à l'occasion de la rentrée universitaire de l'Institut Catholique. Le recteur remercie François Coty « *de son don royal grâce auquel M. Édouard Branly va avoir un laboratoire digne de lui* ». « *Le temps n'est plus, indique Coty, où un beau projet réunissait nos pensées et nos souvenirs. Voici l'œuvre réalisée. Elle a sa place au soleil. Elle fait grand honneur à l'architecte qui l'a conçue avec autant de science que d'art* ». Peu de temps après, le 16 janvier 1933, Branly est fait grand officier de la Légion d'Honneur<sup>25</sup>. Malgré son âge, notre physicien se rend chaque jour au laboratoire. En août 1934, il a le plaisir de recevoir une visite inattendue, celle de Sara Delano Roosevelt, la mère du président des États-Unis. L'origine de cette visite est due à la comtesse Greffulhe. Elle avait parlé avec chaleur du tout nouveau laboratoire d'Édouard Branly à madame Roosevelt, tant et si bien que cette dernière a voulu découvrir par elle-même, ce laboratoire flambant neuf que l'illustre savant avait dû attendre si longtemps. Branly travaille alors sur l'élaboration d'un thermomètre très fiable. Il remplace pour cela la base du thermomètre, ordinairement constitué par une petite ampoule de verre, par une petite ampoule métallique. La température donnée par différents thermomètres de cette construction présentent une très faible dispersion, contrairement à ce qui se passait pour les thermomètres classiques de l'époque. Branly, à son habitude, décrit son invention dans un compte rendu à l'Académie des sciences intitulé « *Thermomètre à base métallique* ». Cette publication, datée du 23 décembre 1935, sera la dernière de Branly qui est alors dans sa quatre-vingt onzième année et qui a fabriqué de ses mains ce nouveau thermomètre.

## Dernières années

---

Le vieux savant reçoit de nombreuses récompenses. C'est ainsi qu'on lui décerne, en mars 1936, la médaille d'or de l'Union littéraire et que le Conseil municipal de Paris décide, le 16 janvier 1938, de donner le nom de Branly à un tronçon de voie du Champ de Mars. « *Paris s'honore, dit le représentant du conseil municipal, de rendre hommage à l'illustre savant qui a porté si haut le renom de la science française et qui unit au génie, toute la gloire d'une vie exemplaire de simplicité, de labeur opiniâtre et de noble désintéressement* ». Mais, il faut bien le dire, il s'agit d'une voie quelque peu fantôme, placée au milieu du Champ de Mars, ce qui fait dire à Branly : « *Si je vous comprends bien, la tour Eiffel a changé d'adresse et c'est*

---

<sup>25</sup> Branly sera fait Grand-croix de la Légion d'honneur, la plus haute distinction de l'ordre, en janvier 1938.

*moi qui suis devenu son concierge !* » L'attribution d'une voie de son vivant est toutefois un honneur rarissime. Finalement le 30 janvier 1941, après la mort du savant, le préfet de la Seine attribuera le nom de Branly à la partie du quai d'Orsay située entre le pont de l'Alma et le boulevard de Grenelle, partie symbolique autant que prestigieuse puisqu'elle passe devant la tour Eiffel, sauvée de la destruction par son rôle d'émetteur radio !

En octobre 1938, Branly part fêter l'anniversaire de ses quatre-vingt quatorze ans à Amiens, où le maire de la ville a organisé une cérémonie en son honneur. Mais le paysage s'assombrit. Comme l'indique sa fille Élisabeth : *« Après l'alerte de 1938, les nuages précurseurs de guerre s'accumulent de plus en plus et nos inquiétudes aussi »*. L'inévitable arrive en septembre 1939 : la déclaration de guerre, le troisième conflit auquel Branly assiste. Malgré son âge, notre physicien veut se rendre utile : *« On peut bien m'utiliser pour des services médicaux, des recherches scientifiques, n'importe quoi, pourvu que je ne reste pas inutile dans mon coin »* dit-il. Mais la famille Tournon se voit offrir une hospitalité généreuse loin de la capitale, qu'elle accepte compte tenu de la diminution des forces du savant. *« Une fois la décision prise, raconte sa fille Élisabeth, une voiture spacieuse et un bon chauffeur arrêtés, mon mari, mes filles et moi, partons avec mon père dans le Limousin, au château de Lajudie, où nous sommes affectueusement attendus. Le capitaine de corvette Charles de Lajudie, sa femme et ses enfants, depuis l'an passé, ont prévu l'arrivée de Branly ; sa chambre confortable donnant sur un parterre de sauges éclatantes est prête. Aussi, après un excellent voyage se déclare-t-il très satisfait. Pendant quatre mois, le savant jouira de la nature, de la beauté des lieux, de la gaieté de ses petites filles, Florence et Marion, et de leurs jeunes amis Paulette et Pierre de Lajudie. Le 24 octobre, on fête ses quatre-vingt quinze ans. Des journalistes arrivent en auto de Paris pour l'interviewer, et lui faire des vœux. Cependant, à la fin de décembre c'est le retour à Paris où, hélas, le froid est presque aussi sévère que celui du Limousin. Le savant, malgré toute l'ingéniosité de ses enfants pour le ragaillardir, sent peu à peu le découragement l'envahir, un*

Édouard Branly dans l'appartement de sa fille Élisabeth avec ses petites filles Florence et Marion.



découragement moral implacable. Ne plus pouvoir travailler ! Son laboratoire est fermé ; son préparateur Gauthier mobilisé et on l'entend murmurer : si je ne puis plus travailler, à quoi bon vivre ? Janvier et février sont mornes. » Élisabeth Branly-Tournon évoque la suite : « Au début mars, mon père surmonte une grippe et, de l'avis du professeur Sergent qui le soigne, semble devoir se remettre. Le Jeudi Saint, l'abbé Paul Buffet le prépare à recevoir ses Pâques à la maison. Il se sent bien et bavarde à cœur ouvert avec moi. Mais voici le vendredi matin, mon père faiblit ; il m'appelle, et après m'avoir attirée à lui, me demande de ne pas le quitter. Une angoisse affreuse me saisit, je ne puis mesurer ma peine. Pendant deux jours, une lutte sourde s'engage entre une constitution particulièrement vigoureuse et la mort. Branly résiste, les yeux clos, entouré de tous ses enfants et petits enfants. Il s'éteindra le dimanche de Pâques, 24 mars, au dernier rayon de soleil. » Par un curieux concours de circonstances, il se produit ce jour-là un orage magnétique<sup>26</sup> d'une rare violence. Cet orage magnétique entraîne la coupure des communications par ondes courtes entre les États-Unis et l'Europe et perturbe très sérieusement les communications par grandes ondes. Les services des transmissions télégraphiques sont également interrompus, les lignes électriques sont gravement perturbées, des aurores boréales sont observables à des latitudes inhabituelles. Certains y ont vu « des signes du ciel ».

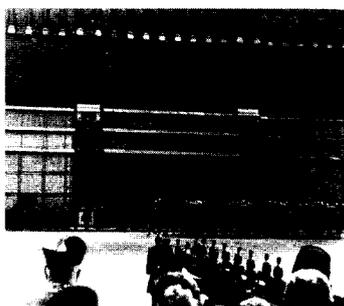
Dès 21 heures, la radio annonce la triste nouvelle : « Branly n'est plus ». Le lendemain, dès le début de la matinée, les grands dignitaires viennent s'incliner devant la dépouille du savant. C'est d'abord le Président de la République, puis le ministre du Commerce et de l'Industrie, le Secrétaire d'État à la marine, les hauts fonctionnaires et de nombreuses autres personnalités. Trois jours plus tard, le jeudi matin, le corps de Branly est transféré dans son laboratoire de l'Institut Catholique, transformé en chapelle ardente. C'est Monseigneur Baudrillart, la voix étranglée par l'émotion qui accueille le cercueil. Le peuple de Paris rend un dernier hommage à son grand savant qu'il admirait tant. Les gens se pressent devant l'Institut Catholique : « Jamais, dit sa fille Jeanne, je n'ai vu, dans aucune occasion, une foule plus patiente et plus recueillie, et je n'ai jamais vu une foule plus variée. Les gens du quartier, des plus humbles aux plus notoires, sont tous allés prier, ou au moins, s'incliner devant le cercueil ». Les télégrammes de sympathie viennent des quatre coins du monde. Le cardinal Maglione, secrétaire d'État du Vatican, transmet à Monseigneur Baudrillart ce message : « Sa Sainteté, connaissant les liens qui unissent Votre Excellence au grand savant Édouard Branly, me charge de vous exprimer ses paternelles condoléances pour la disparition de l'illustre défunt. Il offre ses prières pour le repos de son âme.

<sup>26</sup> Voir par exemple, *L'environnement spatial* (collection Que sais-je ?), Jean-Claude Boudenot, PUF, 1995.

*J'ajoute mes vives condoléances personnelles. » Il y a aussi ce message de Marie-Christine Marconi, veuve de Guglielmo Marconi : « Je vous prie de bien vouloir interpréter auprès de la famille d'Édouard Branly et des institutions scientifiques françaises, mes très vives condoléances pour la perte du grand savant. »*

Le gouvernement décide de lui faire des obsèques nationales. La cérémonie est fixée au samedi 30 mars 1940, à 10 heures du matin, à Notre-Dame de Paris, dans une France encore libre. Le ciel est gris et bas, une pluie drue tombe sur la ville. Cela ne fait pas reculer la foule, bien décidée à rendre un dernier hommage à son savant. Le bourdon de la cathédrale sonne le glas puis, les orgues retentissent. Le Président de la République, Albert Lebrun, est accueilli par le cardinal Verdier. Il prend place au premier rang, face à la bière recouverte d'un drapeau tricolore. La messe est dite par Monseigneur Marmottan, évêque de Saint-Dié. Grâce à la radio découverte par Branly, elle peut être suivie partout en France, jusqu'au front où se déroule la « drôle de guerre ». La cérémonie s'achève, la pluie a cessé, il fait maintenant presque beau. Le cercueil est porté sur le parvis au son de la Marche funèbre de Chopin. Albert Sarraut, alors ministre de l'Éducation nationale, prend la parole : « Pour un instant, la grande anxiété humaine s'est détournée du drame de la guerre, afin d'incliner sa piété sur l'humble lit de mort où l'illustre savant, dont la découverte apportait au monde une éblouissante espérance de fraternité, s'est endormi dans le silence austère de sa désillusion, mais aussi, dans la sérénité infinie de sa conscience et de sa foi. » Après le défilé des troupes de la garnison de Paris devant le cercueil, le cortège funèbre s'ébranle. Sa famille proche et quelques amis l'accompagnent à sa dernière demeure, le caveau de famille situé au Père Lachaise, où repose déjà Marie, sa tendre épouse.

Les obsèques  
nationales d'Édouard  
Branly.



Le 24 novembre 1940, le cinquantième anniversaire de la découverte de l'effet Branly est célébré. Une cérémonie a lieu à l'Institut Catholique et une plaque de marbre est apposée sur le mur extérieur de l'ancien laboratoire, rue de Vaugirard. Quinze ans plus tard, en 1955,

Monseigneur Blanchet, Recteur de l'Institut Catholique de Paris, prend la décision de créer une école répondant aux besoins de l'industrie électronique alors naissante. L'abbé Valentin est chargé d'assurer le démarrage de cette nouvelle école, l'Institut Supérieur d'Électronique de Paris (ISEP), appelée « École Branly ». La direction de l'école est rapidement confiée à un polytechnicien, l'abbé Jean Vieillard. L'école est fondée sur les lieux même du laboratoire d'Édouard Branly<sup>27</sup>. Le nom du grand savant est ainsi perpétué. Ainsi que le dira le 24 mars 1960 le duc de Gramont, membre de l'Académie des sciences et président de l'Institut d'optique, lors des cérémonies commémoratives du vingtième anniversaire de la mort du savant : « *Rendre hommage à Édouard Branly qui par son œuvre, sa modestie, son labeur persévérant, son désintéressement, sa probité scientifique, compte parmi les meilleurs fils de notre pays, c'est montrer à notre jeunesse quelles ressources profondes la France peut tirer de la vie de ses grands hommes passés et présents* ». Deux ans plus tard, le 24 mars 1962, un buste de Branly, œuvre du sculpteur Sarrabezolles, est inauguré au jardin du Luxembourg, près de la porte de la rue de Fleurus, à quelques centaines de mètres du laboratoire où le savant a passé toute sa vie.

### Le Musée Branly

Le Musée Branly est situé dans les locaux de l'Institut Catholique, rue d'Assas, dans le sixième arrondissement de Paris. On peut voir dans les vitrines du Musée, une partie des instruments décrits dans les ouvrages de Branly. On y découvre également la fameuse salle de cuivre. Le site Internet du Musée (<http://museebranly.isep.fr>) permet de faire une visite virtuelle et de découvrir les différents appareils exposés. Par ailleurs, un catalogue très agréable à lire, *Musée Branly, appareil et matériaux d'expériences*, Association des Amis d'Édouard Branly (1997), permet de découvrir de façon plus approfondie les instruments présentés.

---

<sup>27</sup> Voir par exemple, ISEP : *une école d'ingénieurs du troisième millénaire, 50 ans d'histoire*. Ouvrage collectif, édité à l'occasion du cinquantenaire de l'École.



# 2

## La science au XIX<sup>e</sup> siècle

---

Édouard Branly est né en 1844. Il est intéressant de restituer le contexte de la physique à cette époque. Des résultats qui nous semblent aujourd'hui fondamentaux, n'étaient pas encore connus à la naissance de Branly. Le fameux principe de la conservation de l'énergie n'était pas encore établi. D'un côté, il y avait la notion de travail, de l'autre, la notion de chaleur. Le courant électrique était encore une notion bien jeune. Elle avait été introduite par Ampère, une vingtaine d'années plus tôt. En revanche, on était bien loin d'imaginer que ce courant puisse être constitué par le mouvement d'une myriade de petites charges, les électrons. En effet, ces derniers n'ont été découverts qu'en 1897 (c'est-à-dire, après la découverte par Branly, en 1890, du phénomène de radioconduction). D'ailleurs, ils étaient encore loin de faire l'unanimité dans le rang des physiciens. En 1844, on sait peu de chose sur la constitution de la matière. En particulier, la notion d'atomes ne sera universellement admise par les physiciens qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle.

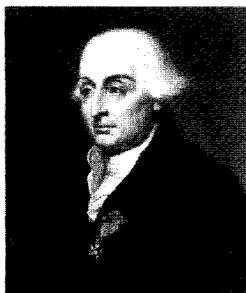
### La mécanique, science fondatrice

---

Un physicien et historien des sciences, J.C. Poggendorff indique, à juste titre, que Galilée « mériterait le titre de fondateur de la physique, si un seul homme avait pu fonder une science aussi vaste et aussi variée ». En effet,

Galilée, en alliant l'expérimentation à l'utilisation des mathématiques, donne à la physique, à partir de 1600 environ, une puissance insoupçonnée. Il fournit à la mécanique des bases solides. Le hollandais Huygens corrobore et amplifie les travaux de Galilée. On lui doit, en particulier, la découverte de la conservation de la quantité de mouvement. Newton, « juché sur des épaules de géants », en publiant ses *Principia*, sans doute le plus grand livre de physique jamais écrit, structure la mécanique pour plus de deux siècles. Les *Principia* sont en effet, à la fois, le premier manuel de mécanique générale, le premier manuel d'hydrodynamique et le premier manuel de mécanique céleste. Lagrange s'exclamera : « Il n'y a qu'une seule loi dans l'Univers, et c'est Newton qui l'a trouvée ». Les *Principia* de Newton – qui datent de 1687 – ne sont pas plus éloignés de la naissance de Branly (1844), que cette dernière ne l'est de notre époque (2005). C'est dire si la physique au temps de Branly était différente de celle que l'on trouve aujourd'hui dans les manuels de cours.

Les mathématiques et la mécanique sont les branches qui avancent le plus rapidement. Newton a montré le chemin : la mécanique se



Joseph Louis Lagrange (1736-1813).

## Lagrange et la mécanique

Lagrange trace ainsi, avec une admirable clarté, les grandes lignes de la mécanique jusqu'à son époque : « *La dynamique est la science des forces accélératrices ou retardatrices et des mouvements variés qu'elles doivent produire. Cette science est due entièrement aux modernes et Galilée est celui qui en a jeté les premiers fondements... Huygens, qui paraît avoir été destiné à perfectionner et compléter la plupart des découvertes de Galilée, ajouta à la théorie des graves, celles du mouvement des pendules et des forces centrifuges et prépara ainsi, la route à la grande découverte de la gravitation universelle. La mécanique devint une science nouvelle entre les mains de Newton et ses principes mathématiques, qui parurent pour la première fois en 1687, furent l'époque de cette révolution* ».

Lagrange annonce, dans son avertissement à sa *Mécanique analytique*, son programme : « *Ceux qui aiment l'analyse verront avec plaisir la mécanique en devenir une nouvelle branche, et me sauront gré d'en avoir ainsi étendu le domaine [...] On ne trouvera pas de figures dans cet ouvrage. Les méthodes que j'y expose ne demandent ni constructions, ni raisonnement géométrique ou mécanique, mais seulement des opérations algébriques assujetties à une marche régulière et uniforme [...] Cette méthode, dans laquelle la notion de force disparaît, doit permettre de résoudre tous les problèmes, sans que son utilisateur ait à dépenser, en principe, la moindre dose d'ingéniosité* ».

nourrit des avancées mathématiques et d'autre part, le mouvement des astres peut être prédit par le calcul grâce à la loi de gravitation universelle de Newton. Il n'est pas rare que les plus grands mathématiciens soient également les plus grands physiciens. Ainsi, Laplace, surnommé le « Newton français », développe de façon extraordinaire la mécanique céleste.

Lagrange, autre grand mathématicien, va apporter un nouveau point de vue qui se révélera extrêmement fécond. Il fonde la *Mécanique analytique*, dont l'ambition est de faire de la mécanique, une branche des mathématiques (voir encadré). La mécanique analytique (1788) de Lagrange est une véritable révolution. En faisant disparaître la notion de force, Lagrange permet une approche systématique des problèmes de mécanique et donne à cette science un cadre très général. Hamilton (surnommé le « Lagrange irlandais » et même le « Newton irlandais ») dote, dans les années 1830, la mécanique d'un outil extrêmement puissant et prolonge ainsi les travaux de Lagrange.

## L'électricité, des origines à Édouard Branly

---

### *Les origines de l'électricité*

L'histoire de l'électricité remonte au VI<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ avec Thalès de Milet, qui – avec ses contemporains – remarque que l'ambre jaune frotté à sec acquiert la propriété d'attirer les corps légers. L'ambre jaune se disant en grec *ēlektron*, le phénomène associé sera baptisé du même nom à la Renaissance par William Gilbert. Ce physicien, de vingt ans le cadet de Galilée, réalise à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, des expériences systématiques dont le but est de différencier les deux types de force électrique et magnétique. Il compare l'aimant à l'ambre et montre que le premier n'attire que le fer ou d'autres aimants, tandis que le second – après frottement – attire tous les corps légers. Il publie ses travaux en 1600, dans un ouvrage remarquable « *De magnete* » (De l'aimant), dans lequel il expose en particulier, sa découverte du magnétisme terrestre. Il est le premier à assimiler la Terre à un grand aimant. Plus tard, Otto von Guericke, fameux bourgmestre de Magdebourg, essaie de montrer que la gravité résulte du frottement de l'air sur la terre laquelle, pense-t-il, est essentiellement constituée de « particules sulfureuses ». Pour le montrer, il frotte avec sa main une boule de soufre qu'il fait tourner. Il invente ainsi fortuitement la première machine électrostatique. Le procédé est repris et amélioré par Francis Hauksbee

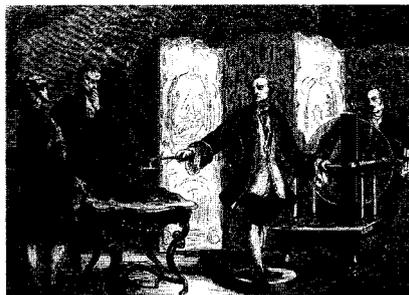


En frottant avec sa main une boule de soufre qu'il fait tourner, Otto von Guericke invente fortuitement la première machine électrostatique.

qui réalise, en 1706, un générateur électrostatique dans lequel la boule de soufre est remplacée par un globe de verre frotté avec la main ou avec une étoffe de laine. Petit à petit, le globe de verre frotté à la main est remplacé par un disque de verre frotté par un patin en cuir, l'électricité étant alors recueillie par un tube de cuivre. De telles machines électrostatiques sont commercialisées vers la fin des années 1740.

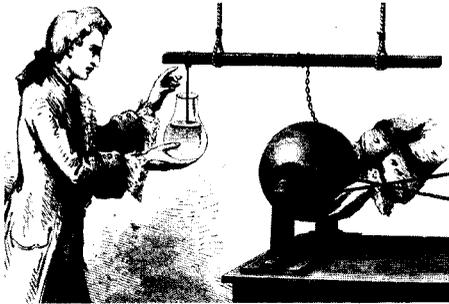
Stephen Gray fait, en 1729, la distinction entre conducteurs et isolants. Cette découverte est une fois de plus fortuite. Gray suspend une corde de chanvre au plafond à l'aide de fils de soie. L'une des extrémités de la corde de chanvre est reliée à un générateur électrostatique. L'autre extrémité est alors capable d'attirer des corps légers. Mais les fils de soie cassent. Il les remplace donc par un fil métallique plus solide... alors le phénomène disparaît : « *Quand les effluves arrivent aux fils métalliques qui supportent la corde, ils passent par ceux-ci jusqu'au plafond où ils sont fixés et ne progressent plus le long de la corde* ». Poursuivant ses essais, Gray, aidé de Wheeler, constate que le verre, la résine, le diamant, les huiles, les oxydes métalliques... sont – comme la soie – des isolants, tandis que les métaux, les solutions acides ou alcalines, l'eau, le corps des animaux... sont des conducteurs. Peu après, Charles du Fay reprenant ces expériences (1733) montre qu'il existe deux sortes d'électricité. L'une « *vitrée* », l'autre « *résineuse* » ; « *Le caractère distinctif de ces deux électricités est de se repousser elles-mêmes et de s'attirer l'une l'autre* ». Le 20 avril 1746, Petrus Van Musschenbroek, professeur à Leyde, fait part à son ami Réaumur de l'une de ses expériences « *frappantes* » : « *Tout à coup, ma main droite fut frappée avec tant de violence, que j'eus tout le corps ébranlé comme d'un coup de foudre. La main n'est point déplacée par cette commotion, mais le bras et tout le corps sont affectés d'une manière terrible que je ne puis exprimer. En un mot, je croyais que c'était fait de moi* ». L'abbé Nollet, ancien assistant de Du Fay et alors assistant de Réaumur, reproduit l'expérience, baptise « *bouteille de Leyde* » le dispositif de Van Musschenbroek, et avec ses talents d'expérimentateur et de vulgarisateur, la fait connaître au tout-Paris et jusqu'à Versailles, devant le roi et la cour.

Expérience  
d'électrostatique dans  
un cabinet de  
physique.



## Bouteille de Leyde

La « bouteille de Leyde » est un récipient en verre fermé par un bouchon de liège et rempli à moitié d'eau. Une tige métallique traverse le bouchon, l'une de ses extrémités baigne dans l'eau, l'autre est reliée à une machine électrostatique. Il s'agit donc d'un condensateur qui se décharge quand l'expérimentateur touche la tige et la paroi de verre.



Charge d'une bouteille de Leyde à l'aide d'une machine électrostatique.

Tandis que l'abbé Nollet publie, en 1745, les « Conjectures sur les causes de l'électricité des corps », un homme d'affaires bien établi de Philadelphie, journaliste et éditeur à succès, élabore une théorie en opposition avec celle de Nollet. Cet homme n'est autre que Benjamin Franklin. Pour lui, le fluide électrique apparaît sous deux états, notés + et - et ainsi, la décharge d'une bouteille de Leyde est liée à une remise à l'équilibre des deux excès d'électricité existant dans la bouteille. Il développe cette notion à partir de 1750, énonce le principe de conservation de la charge électrique, et interprète l'attraction exercée par un corps électrisé sur un corps léger par un principe d'action à distance. À la même époque (1752), Benjamin Franklin invente le paratonnerre pour « protéger les maisons, églises, navires et autres de la foudre », ce qui lui vaut, 20 ans plus tard, d'entrer à l'Académie des sciences de Paris.

Ainsi, en 1770, quatre notions fondamentales sont acquises : l'existence de deux types de charges, positive et négative, la notion de conservation de la charge électrique, la mise en évidence de deux types de forces, l'une attractive, l'autre répulsive, ainsi que de deux types de matériaux : les isolants et les conducteurs. Il manque toutefois une loi fondamentale pour couronner l'électrostatique, c'est au français Charles Coulomb que reviendra l'honneur de combler cette lacune. C'est également Coulomb qui, en découvrant les lois d'action des charges magnétiques en fonction de la distance, s'inscrit comme le continuateur de William Gilbert, auteur en 1600, de la première théorie du magnétisme.

## De Coulomb à Volta

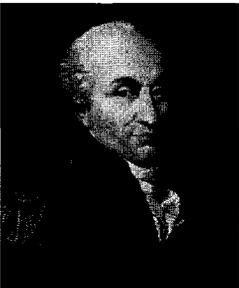
Charles Augustin Coulomb fait ses études au sein de la très réputée École du Génie de Mézières qu'il intègre en 1760.

### L'École du Génie de Mézières : une des premières « Grandes Écoles »

Les premières Grandes Écoles sont apparues au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle. L'École des Ponts et Chaussées fut fondée en 1747, par Perronet, tandis que l'École du Génie de Mézières l'a été en 1748. Pour entrer à l'École du Génie de Mézières, il fallait passer un examen d'admission qui avait lieu à Paris. L'examineur était un membre de l'Académie des sciences nommé par le ministre de la Guerre. Les cours duraient deux ans et le nombre total d'élèves était de vingt, renouvelés par moitié tous les ans. L'enseignement comportait des mathématiques, de la géométrie descriptive, de la chimie et naturellement, des cours sur la coupe des pierres, les bâtiments, les fortifications, etc.

L'École du Génie de Mézières jouissait d'une brillante réputation grâce à la méthode d'instruction qui mêlait opérations de l'esprit et exercice manuel. Gaspard Monge, père de la géométrie descriptive, y a longtemps enseigné et s'en est servi de modèle pour fonder l'École Polytechnique. L'École possédait une bibliothèque riche de plus de cinq mille volumes et un laboratoire de chimie. Malheureusement, en 1794, la Convention décida de déplacer l'École à Metz. Elle ne survécut pas à ce transfert.

Les premières théories scientifiques de Coulomb ont trait à la statique et lui valent d'être nommé membre correspondant de l'Académie des sciences en 1774. En 1779, il rédige un mémoire sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées, lequel est récompensé par l'Académie. Il y introduit, pour la première fois, la notion de moment magnétique, et il fait l'étude du mouvement d'un aimant suspendu dans un champ magnétique, ce qui le conduit à examiner de près la torsion des fils. En 1784, Coulomb détermine la loi de la force de torsion d'un fil de métal. Cette loi lui permet de mesurer des forces très faibles (il sait mesurer le poids d'une masse d'un millionième de gramme). Muni de sa balance de torsion, Coulomb peut maintenant s'attaquer à la « *détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les éléments des corps électrisés du même genre d'électricité se repoussent mutuellement* ». Il lit son mémoire à l'Académie en 1785,



Charles Coulomb  
(1736-1806).

lequel n'est publié qu'en 1788. Il y énonce la fameuse *loi de Coulomb* : « La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité est en raison inverse du carré de la distance du centre des deux globes ». Le grand Jean Baptiste Biot écrit en 1816, que la « *théorie de Coulomb est l'une des mieux établies de la physique et elle donne à l'existence réelle des deux fluides électriques, le plus haut degré de probabilité, pour ne pas dire une certitude entière* ».

### **Jean-Baptiste Biot, maître de Pasteur et membre de trois Académies**



Jean-Baptiste Biot  
(1774-1862).

Jean Baptiste Biot naît à Paris le 21 avril 1774. Il intègre la première promotion de l'École Polytechnique. Remarqué par Laplace pour ses travaux en mathématiques, Biot entre à l'Académie des sciences le 11 avril 1803, à l'âge de vingt-neuf ans. Il est alors chargé, à partir de mai 1806, de diriger la mission de mesure de la méridienne de France jusqu'aux Baléares, mission mouvementée qu'il mène avec Arago. La géodésie<sup>1</sup> le conduit rapidement à l'astronomie, si bien qu'il devient en 1809, titulaire de la chaire d'astronomie de la Sorbonne. Il perfectionne des instruments, ce qui l'amène à s'intéresser à la physique, puis à devenir titulaire de la chaire de physique mathématique du Collège de France. En magnétisme, son nom est immortalisé par la loi de Biot et Savart. En optique, il formule la loi de la polarisation rotatoire de la lumière et se passionne pendant quarante ans à l'interprétation de ce phénomène.

En 1848, il invite un jeune normalien, Louis Pasteur, à refaire devant lui une expérience : « *Vous affirmez bien, dit Biot, que vos cristaux placés à votre droite dévieront à droite du plan de polarisation et que vos cristaux placés à votre gauche dévieront à gauche ?* », « *Oui* » répond Pasteur. Biot fait l'expérience, constate la déviation, prend le bras de Pasteur et lui dit : « *Mon cher enfant, j'ai tant aimé les sciences dans ma vie que cela me fait battre le cœur !* ». Par ailleurs, Biot, grand ami de Champollion, effectue des recherches relatives à l'histoire de l'astronomie égyptienne, ce qui, associé à d'autres travaux d'érudition, lui ouvre les portes, en 1847, de l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres. En 1856, il est élu à l'Académie française. Biot partage ainsi, avec le duc d'Aumale et le naturaliste Cuvier, le très rare privilège d'être membre de trois Académies de l'Institut de France ! Biot s'éteint le 3 février 1862, à quatre-vingt-huit ans, dans sa soixantième année de vie académique.

<sup>1</sup> La géodésie est la science qui a pour objet la détermination de la forme de la Terre, la mesure de ses dimensions ainsi que l'établissement de cartes.



Alessandro Volta  
(1745-1827).

Les années 1790 marquent une transition dans l'histoire de l'électricité. D'une part, Coulomb vient de publier sa loi, d'autre part Luigi Galvani, professeur d'anatomie à l'Université de Bologne, constate que la cuisse de grenouille, qu'il vient de disséquer, se contracte à chaque fois que le nerf et le muscle sont reliés par un arc formé de deux métaux différents (voir encadré). Galvani attribue ce phénomène à une « électricité animale » et entre en controverse avec Alexandro Volta qui pense qu'il n'y a qu'une seule sorte d'électricité. Volta se consacre alors à plein temps à la démonstration de son hypothèse ce qui le conduit à la découverte de la pile. Il fait cette découverte à la fin de 1799, à l'âge de 55 ans. Voici comment il décrit son invention à Sir Joseph Banks, président de la Royal Society : « [...] l'appareil [...] n'est que l'assemblage d'un nombre de bons conducteurs de différentes espèces, arrangés d'une certaine manière, 30, 40, 60 pièces ou davantage, de cuivre ou mieux d'argent, appliquées chacune à une pièce d'étain ou ce qui est beaucoup mieux, de zinc, et un nombre égal de couches d'eau ou de quelque autre humeur qui soit meilleur conducteur que l'eau simple, comme l'eau salée, la lessive, etc. ou des morceaux de carton, de peau, ... bien imbibés de ces humeurs ; de telles couches interposées à chaque couple ou combinaison des deux métaux différents, une telle suite alternative, et toujours dans le même ordre, de ces trois espèces de conducteurs, voilà tout ce qui constitue mon nouvel instrument... ». L'invention de la pile ouvre une nouvelle ère, celle de l'électrocinétique. La pile permet en effet d'obtenir un courant électrique *continu*. François Arago traduit bien en 1831, l'admiration qu'elle suscite : « Cette pile de tant de couples dissemblables, séparés par un peu de liquide, est, quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé... ». Le 7 novembre 1801 Volta fait une démonstration de ses expériences à l'Académie des sciences devant Bonaparte. Celui-ci ordonne la construction en 1813 d'une grande batterie, de 600 unités, dans les sous-sols de l'École Polytechnique. De son côté, Humphrey Davy dispose à la Royal Society, dès 1807, d'une batterie de 3000 unités grâce à laquelle il découvrira, par électrolyse, le sodium et le potassium.

Le 7 novembre 1801,  
Volta fait une  
démonstration de ses  
expériences à  
l'Académie des  
sciences devant  
Bonaparte.



## Une découverte fortuite

La découverte de Galvani est un bon exemple de découverte fortuite. Poggendorff en indique ainsi les circonstances : « *Sa femme [Madame Galvani] souffrait d'une maladie de poitrine et les médecins lui avaient ordonné du bouillon de cuisses de grenouilles. Galvani avait coutume, par un sentiment de délicate sollicitude pour sa femme, et à cause de son habileté comme anatomiste, de les dépouiller lui-même. Un jour, que des grenouilles préparées se trouvaient sur la table, le hasard voulu que son aide appuyât la pointe d'un scalpel sur leurs nerfs cruraux, en même temps qu'une autre personne tournait, sans intention particulière, une machine électrique qui se trouvait dans la chambre et en tirait des étincelles. Immédiatement les grenouilles furent animées de convulsions violentes. Galvani venait précisément de quitter la chambre, mais sa femme s'y trouvait encore ; et ce fut elle qui fit la remarque que les grenouilles avaient des mouvements convulsifs, toutes les fois que l'on tirait une étincelle du conducteur. Elle fit part à son mari de son étrange observation. Galvani revint, se convainquit de l'exactitude du fait, et s'appliqua avec d'autant plus d'ardeur à l'étude de ces phénomènes qu'il crut y voir la confirmation d'une de ses hypothèses favorites, celle d'une électricité spéciale aux animaux* ».

## De Volta à Oersted

La découverte de la pile, qui comme l'aimant possède des pôles, fait soupçonner l'idée d'une parenté entre le monde de l'électricité et celui du magnétisme. Mais cette unique et trop simple analogie a donné une orientation insuffisante à la recherche dans ce domaine, ce qui explique sans doute les vingt ans qui séparent la découverte de la pile et l'expérience décisive d'Oersted montrant le lien effectif entre électricité et magnétisme. La pile est alors assimilée à un condensateur. La notion d'échange d'énergie n'est pas encore apparue en physique et les notions de tension et de courant n'ont pas encore été dégagées (c'est Ampère qui les introduira) et celle de charge électrique était encore bien vague.

C'est toutefois bien la pile qui permet au danois Hans Christian Oersted de faire une avancée remarquable. Oersted est un esprit universel. Il commence par travailler dans la pharmacie de son père, puis très naturellement, poursuit des études pharmaceutiques, ce qui ne l'empêche pas de se passionner pour les mathématiques, la physique et la chimie, mais également pour la philosophie pour laquelle il décide de passer une thèse de doctorat ès lettres sur Kant. En 1806, il devient professeur à l'université de Copenhague et fabrique lui-même les



Oersted découvre qu'une aiguille aimantée est déviée au voisinage d'un courant.

instruments qui lui permettent d'étudier l'électricité, dont une pile de Volta. Il découvre, le 15 février 1820, en préparant un montage destiné à l'un de ses cours, qu'une aiguille aimantée est déviée au voisinage d'un courant (« conflit ») électrique. Dans son expérience historique, Oersted fait passer un courant dans un fil de platine, qui est ainsi porté à incandescence : il constate qu'au moment où la pile est mise en action, l'aiguille aimantée d'une boussole posée non loin de là sur la table se met à bouger. Il répète son expérience, constate que l'aiguille tourne en sens inverse si l'on intervertit les pôles de la pile, et que l'effet ne se produit pas si le fil est placé perpendiculairement à l'aiguille. Il se rend immédiatement compte de la portée de sa découverte et rédige un mémoire de quatre pages intitulé : « Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticum » (Expériences relatives à l'effet du conflit électrique) qu'il publie le 21 juillet 1820 et qu'il adresse à toutes les sociétés savantes d'Europe. Le 4 septembre 1820, Arago rend compte de cette expérience à l'Académie des sciences et le 11 septembre, il y répète les expériences d'Oersted et lit son mémoire.

### *Ampère crée l'électrodynamique*

Alors que ni Oersted, ni personne d'autre n'avait osé conclure de son expérience que l'électricité et le magnétisme étaient deux formes d'un même phénomène susceptible d'agir l'une sur l'autre, André Marie Ampère, une semaine seulement plus tard, le 18 septembre, en donne une interprétation. Les comptes rendus de la séance du 18 septembre 1820 de l'Académie des sciences indique que : « M. Ampère lit un mémoire contenant des expériences qui lui sont propres et qui ajoutent de nouveaux faits aux expériences de M. Oersted relatives à l'action du galvanisme sur le magnétisme ». Ampère introduit alors dans ses notes d'expérience son « bonhomme d'Ampère » : étendu sur le fil électrique, parcouru des pieds à la tête par le courant, le regard tourné vers la boussole, il indique de son bras droit la direction de la force magnétique. Dans un effort prodigieux, dont il rend compte presque chaque semaine pendant plusieurs mois à l'Académie, Ampère va créer l'électrodynamique. Le 25 septembre 1820, « M. Ampère lit un mémoire sur les effets produits sur l'aiguille magnétique par la pile voltaïque et qui fait suite au mémoire lu à la séance précédente. Il annonce un fait nouveau, celui de l'action mutuelle de deux courants électriques, sans l'intermédiaire d'aucun aimant. Il fait des expériences pour prouver ce fait<sup>2</sup>, et elles remplissent le reste de la séance ». Ce 25 septembre, Ampère montre également qu'un conducteur enroulé en spirale peut être attiré ou repoussé (suivant le sens du

<sup>2</sup> Ampère a effectué ses expériences historiques dans sa maison de Paris située au 19 rue des Fossés Saint-Victor (aujourd'hui rue du Cardinal Lemoine où une plaque commémorative est apposée).

courant) par le pôle d'un aimant, ce qui est l'effet réciproque de celui constaté par Oersted. Le soir du 25 septembre, il écrit à son fils : « [...] Tous mes moments ont été pris par une circonstance importante de ma vie. Depuis que j'ai entendu parler pour la première fois de la belle découverte de M. Oersted, professeur à Copenhague, sur l'action des courants galvaniques sur l'aiguille aimantée, j'y ai pensé continuellement. Je n'ai fait qu'écrire une grande théorie sur ces phénomènes et tous ceux déjà connus de l'aimant et tenter des expériences indiquées par cette théorie, qui toutes ont réussi et m'ont fait connaître autant de faits nouveaux. Je lus le commencement d'un mémoire à la séance de l'Institut, il y a aujourd'hui huit jours. Je fis les jours suivants, tantôt avec Fresnel<sup>3</sup>, tantôt avec Despretz, les expériences confirmatives. Je les répétai toutes vendredi soir chez Poisson<sup>4</sup>... tout réussit à merveille... ». Cette séance du lundi 25 septembre est vraiment mémorable « il y avait comme prédit les résultats obtenus depuis ».

Le 2 octobre, Ampère indique « qu'on pourrait former une sorte de télégraphe... ». Le 9 octobre « M. Ampère lit un troisième mémoire contenant la suite de ses recherches sur l'aimant, l'électricité et la pile ». Ampère indique lui-même : « C'est sur ces considérations générales [de symétries] que j'ai construit une expression de l'attraction de deux courants infiniment petits, qui n'est à la vérité qu'une hypothèse, mais la plus simple qu'on peut adopter et celle par conséquent qu'on doit adopter ». Ampère n'est pas le seul à vouloir donner une expression analytique rendant compte des observations. Jean-Baptiste Biot y travaille également avec acharnement et se livre à une véritable course contre Ampère pour calculer la force électromagnétique. Le 30 octobre, Biot, aidé de Félix Savart, montre que la force exercée par un très long fil sur un aimant est inversement proportionnelle au carré de la distance. Le 18 décembre 1820, ils calculent la force exercée par un fil infiniment long sur un aimant, puis sur un autre fil, ils énoncent ainsi la fameuse loi, connue maintenant sous le nom de « loi de Biot et Savart ».

Mais revenons à Ampère qui inlassablement poursuit son travail : il intervient de nouveau à l'Académie le 16 octobre, cette fois avec Arago, pour rapporter l'aimantation d'aiguilles d'acier soumises à l'action d'un fil électrique. Pour amplifier l'effet, Ampère enroule le conducteur



André Marie Ampère (1775-1836).

<sup>3</sup> À cette époque, Fresnel loue un logement dans la maison d'Ampère. Ils partagent en commun le goût des échecs, de la philosophie et du bon vin.

<sup>4</sup> Siméon Denis Poisson (1781-1842) est élève (1798) puis professeur (1802) à Polytechnique. Ses dons en mathématiques le font remarquer par Lagrange et Laplace. On lui doit des travaux de toutes premières importances en mathématiques (en particulier, en statistique : distribution de Poisson, 1837) ; en mécanique (crochets de Poisson, 1809) ; en électromagnétisme (équation de Poisson, 1811). Profondément newtonien, il défend l'idée de l'aspect corpusculaire de la lumière, ce qui l'oppose à son collègue académicien Fresnel, auteur de la fameuse théorie ondulatoire.

en hélice, il invente ainsi le « solénoïde » (du grec Solenos, tuyau). Il poursuit ses communications à l'Académie presque à chaque séance : le 30 octobre, le 6 novembre, le 13 novembre et le 27 novembre. C'est à cette époque qu'il construit le premier galvanomètre et qu'il réalise, avec Arago (10 novembre) l'électro-aimant, qui se révélera si utile au dispositif de Morse. Le 4 décembre, il retrouve par une autre voie, la loi donnée par Biot. Il poursuit ses communications les 11 et 26 décembre et continue en janvier 1821 (8 et 15 janvier), ce n'est donc pas moins de treize communications à l'Académie des sciences qu'Ampère aura présentées entre le 18 septembre 1820 et le 15 janvier 1821. Le 2 avril, il lit, lors d'une séance publique à l'Académie, une notice d'ensemble.

Finalement, Ampère consigne les principes fondamentaux de l'électrodynamique dans deux mémoires. Le premier s'intitule « De l'action exercée sur le courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant ». Il y décrit l'action mutuelle de deux courants électriques (ce qui lui permet de définir l'unité « ampère »), puis met en évidence l'action de la Terre (qu'il assimile à un grand aimant) sur un courant, et enfin interprète l'« action mutuelle entre un conducteur électrique et un aimant ». Pour cela, il réalise en particulier des courants de forme circulaire (spires), puis des courants de forme hélicoïdale (solénoïde). Il montre l'équivalence entre un aimant cylindrique et un solénoïde et interprète le magnétisme par l'introduction de « courants ampériens ». Le deuxième mémoire d'Ampère est consacré à : « La détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques », il y introduit la « force de Laplace » et admet que la force exercée entre deux éléments de courant varie en raison inverse du carré de la distance. Ampère est le premier à introduire la notion de courant électrique et à montrer que le courant qui traverse un circuit est le même en tout point. C'est avec une reconnaissance naturelle que l'unité associée porte, depuis 1881, son nom.

### **À qui doit-on les formules d'Ampère, de Biot et Savart et de Laplace ?**

C'est bien Ampère qui le premier donne l'expression de la force élémentaire exercée par un aimant sur un courant et Biot qui trouve l'expression intégrale. Dans le débat entre Biot et Ampère, Laplace, qui a soixante et onze ans, intervient en arbitre impartial. Il demande à Ampère de prouver que l'intégration de sa formule élémentaire redonne bien le résultat de Biot. Ampère présente ses calculs à Laplace avant de les publier... et la loi d'interaction sera baptisée loi de Laplace ! Non seulement, Ampère retrouve la loi de Biot et Savart mais aussi celle de Coulomb concernant la force entre deux aimants.

Paul Janet, dans une belle conférence donnée à la Société française des électriciens le 19 janvier 1933, résume fort bien le travail réalisé par Ampère en 1820, travail qui lui vaudra d'être surnommé par Maxwell « le Newton de l'électricité »<sup>5</sup>. « *Ses découvertes physiques réalisées en 1820, dit Paul Janet, quelques importantes qu'elles soient, ne sont qu'une faible partie de l'œuvre d'Ampère... Son plus beau titre de gloire ce n'est pas une invention mais une idée ; le magnétisme ramené à l'électricité. Voilà la grande et profonde pensée d'Ampère. Il fallait renoncer à expliquer l'électromagnétisme par le magnétisme qui pouvait bien produire des attractions ou des répulsions mais ne pouvait expliquer des rotations comme dans l'expérience d'Oersted. Par une intuition admirable, Ampère prévoit que les solénoïdes se comporteraient comme des aimants. Dès lors, les aimants seraient eux aussi de simples solénoïdes et par conséquent, deux courants doivent agir l'un sur l'autre, fait nouveau que personne n'avait soupçonné jusque-là* ».

## Faraday découvre l'induction

Michael Faraday est une personnalité extraordinaire dans l'histoire de la physique. Il y a, à cela, plusieurs raisons. Il est parfaitement autodidacte, n'utilise pas les mathématiques et consigne scrupuleusement ses quarante-six années de recherche dans un journal qu'il ouvre en 1816 à 25 ans et qu'il referme le 23 mars 1862 à 71 ans. Ce journal, qui comprend 16 041 recherches numérotées, ne contient aucune formule mathématique ! : « *Cependant la marche de son esprit avait la rigueur de l'esprit mathématique* » dira Maxwell. Faraday a la chance de rencontrer le grand chimiste Humphrey Davy qui l'engage à la Royal Institution en mars 1813. Davy dira plus tard : « *Ma plus grande découverte c'est d'avoir distingué Faraday* ». Au contact de Davy, les premiers travaux de Faraday portent tout naturellement sur la chimie. Mais petit à petit, Faraday s'intéresse également à la physique. Il fait, à la fin de l'année 1821, une découverte importante, celle des *rotations électromagnétiques*. Alors que les forces électriques sont de nature attractive ou répulsive, les forces magnétiques s'exercent dans un plan perpendiculaire à celui formé par la ligne de courant et le champ magnétique. Faraday résume en ces termes, à Gaspard de la Rive, son travail : « *Je trouve que les attractions et les répulsions que l'on considère d'habitude entre le fil conjonctif et l'aiguille magnétique, sont des illusions, les mouvements ne sont pas le résultat de quelque force attractive, mais d'une force due au fil, qui au lieu de tendre à en rapprocher ou à en éloigner le pôle le fait tourner sur un cercle sans fin. Mouvement qui dure tant que la batterie est en action* ». C'est ainsi que



Michael Faraday  
(1791-1867).

<sup>5</sup> La citation complète de Maxwell est la suivante : « *L'étude expérimentale par laquelle Ampère a établi les lois de l'action mécanique entre les courants électriques est un des plus brillants exploits de la science... Le tout, la théorie et l'expérience, semble avoir jailli du cerveau du Newton de l'électricité* ».

Faraday réalise le premier ancêtre du moteur électrique. On notera que les travaux de Faraday sont parfaitement contemporains de ceux d'Ampère.

Il existe par ailleurs entre les deux savants une admiration réciproque et la plus parfaite des courtoisies. Par exemple, Ampère écrit à Faraday (le 23 janvier 1822) : « *Je serais trop heureux que vous voulussiez bien accueillir l'hommage de ma reconnaissance et de ma sincère admiration pour vos belles découvertes dans les deux sciences dont j'aimerais le plus à m'occuper si mes travaux ordinaires me permettaient de m'y livrer exclusivement, la physique et la chimie.* » De même, Faraday écrit à Ampère (le 3 septembre 1822) : « *En lisant vos publications et vos lettres, je n'ai pas de difficulté à suivre vos raisonnements ; mais, à la fin, il me semble que j'attends quelque chose de plus pour conclure. J'imagine que l'habitude que j'ai prise de compter trop strictement sur l'expérimentation a un peu émoussé ma faculté de raisonnement et m'enchaîne à terre, et je ne puis y remédier maintenant ni plus tard, car je me compare à un timide navigateur ignorant qui, alors qu'il pourrait hardiment et sûrement traverser une baie ou un océan à l'aide d'une boussole infailible dans son action et ses principes, est effrayé de perdre de vue le rivage parce qu'il ne comprend pas le pouvoir de l'instrument qui doit le guider.* » Faraday se sentait handicapé par le fait qu'il ne comprenait pas les mathématiques, il s'en ouvrira à Ampère ainsi qu'à Maxwell. Ces deux savants avaient toutefois parfaitement compris le génie de Faraday et s'attacheront à synthétiser leurs travaux dans un langage dépourvu de formalisme<sup>6</sup>.

Une dizaine d'années plus tard, le 29 août 1831, précisément, Faraday fait la découverte de l'induction qui immortalisera son nom. Sur un anneau en fer de « 6 pouces de diamètre et 1 pouce d'épaisseur », il enroule deux bobines de fil de cuivre en spirales isolées par de la ficelle. Les extrémités d'une de ces bobines sont connectées à une pile, et celles de la seconde à un « galvanomètre » simplement formé d'un fil placé au-dessus d'une aiguille aimantée. Il observe qu'à chaque ouverture ou fermeture du circuit de la pile, l'aiguille aimantée dévie. Il constate que le *courant induit*, comme il l'appelle, n'apparaît que de façon transitoire lors des seules fermetures et ouvertures du circuit. Le 17 octobre 1831, il découvre le second volet du phénomène d'induction : l'apparition de courants induits dans un solénoïde lorsque l'on y fait pénétrer un barreau aimanté. Le 24 novembre 1831, il décrit, dans un mémoire communiqué à la Royal Society, ses découvertes sur l'induction. Faraday avance à grands pas dans le

---

<sup>6</sup> Maxwell comprenant parfaitement l'importance des travaux de Faraday écrira : « [...] *En commençant l'étude sur l'électricité, je résolu de ne lire aucun travail mathématique sur ce sujet, avant de posséder à fond les recherches expérimentales sur l'électricité de Faraday* ».

domaine de l'électromagnétisme. Il est le premier à concevoir intuitivement la notion de champ, tout en utilisant la notion d'éther pour justifier la transmission des actions de proche en proche. Il matérialise les « lignes de force magnétique » par de la limaille de fer. Les traditionnelles expériences associées faites dans nos classes de lycée sont directement issues des cahiers de laboratoire de Faraday qui a été jusqu'à y fixer la limaille, dessinant ainsi les lignes de champ magnétique engendrées par un fil ou un solénoïde parcouru par un courant.

### *La loi d'Ohm : une loi simple qui a beaucoup de mal à s'imposer*

La possibilité d'utiliser un courant continu grâce à la pile de Volta, et la découverte de l'interaction entre courant électrique et magnétisme, faite par Oersted et formalisée par Ampère, ont donné un nouvel élan aux recherches sur l'électricité et le magnétisme. Nous venons de voir le rôle fondamental d'Ampère et de Faraday dans ce domaine. Pendant cette période (1825-1845), qui s'étend jusqu'à la naissance de Branly, Ohm, Gauss et Weber font également des avancées remarquables.

Une des lois les plus universellement connues de la physique est la loi d'Ohm. Curieusement, la vie et l'œuvre de ce physicien, sont, à contrario, souvent méconnues. Georg Simon Ohm, d'origine humble, naît le 16 mars 1789 près de Erlangen en Allemagne. C'est à Cologne qu'il fera ses travaux sur les « courants galvaniques ». Il fonde sa théorie sur une forte analogie avec les équations du mouvement de la chaleur données en 1822 par le physicien français Joseph Fourier dans sa « théorie analytique de la chaleur ». Après cette modélisation mathématique et une série d'expérimentations, Ohm écrit en 1826 un article dans lequel il énonce sa fameuse loi reliant la tension à l'intensité. Cet article, ainsi que le livre (maintenant très célèbre) qu'il écrit l'année suivante (*Die Galvanische Kette*) lui valent des critiques acerbes. Ces critiques ne sont peut être pas étrangères au fait qu'il perd son poste à l'université. Il est également probable que cette regrettable situation soit aussi due au différend qui l'oppose à Johannes Schulze, alors tout puissant au ministère allemand de l'éducation. Ce n'est que 22 ans plus tard, en 1849, il a alors 60 ans, qu'il est nommé titulaire de la chaire de physique de l'université de Munich. Avant d'obtenir ce poste, il est professeur d'école jusqu'en 1833 puis enseigne à l'Institut Polytechnique de Nuremberg. Son véritable mérite est toutefois perçu par la jeune génération de physiciens allemands. Dès 1829, sa théorie

est confirmée par des expérimentations précises effectuées par Gustav Fechner, puis utilisée par Lenz (1831), Gauss et Weber (1832-1833) ainsi que Hermann Jacobi (1833-1835). Les physiciens français et anglais ne réalisent, quant à eux, qu'à la fin des années 1830, et au début des années 1840, les conséquences profondes de ses travaux. Il est symptomatique de constater que la loi d'Ohm ne figure pas dans le cours de l'École Polytechnique de 1840.

### *L'enseignement de l'électricité lorsque Branly est étudiant*

On peut se faire une idée de l'enseignement de la physique à l'époque où Édouard Branly est étudiant en analysant le contenu des cours de l'École Polytechnique<sup>7</sup>. En effet, depuis sa création, le programme du concours d'entrée de cette École influence largement le programme des autres concours aux Grandes Écoles et de ce fait façonne l'enseignement donné en classe préparatoire (mathématiques spéciales). Rappelons, par ailleurs, qu'Édouard Branly se présente, en 1864, au concours d'entrée de l'École Polytechnique et qu'il y sera admissible. Il est donc intéressant d'analyser le contenu du cours de physique enseigné dans cette École, dans les années 1850. Une première partie (environ un tiers du cours) est consacrée à l'électricité. Tout d'abord, l'électricité statique (propriétés des charges électrostatiques, phénomène d'influence, électroscope), puis sources d'électricité (en particulier, bouteille de Leyde et batterie) ; ensuite, l'électricité atmosphérique (foudre et protections associées). La dernière leçon d'électricité est consacrée, de façon assez détaillée (une trentaine de pages), à « la pile de Volta ». Le contenu de cette première partie est donc une synthèse des connaissances acquises dans ces domaines jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle. La seconde partie, plus courte, est dédiée aux phénomènes magnétiques : aimants, actions magnétiques et magnétisme terrestre. Ici encore, les connaissances transmises sont actualisées et intègrent en particulier le résultat des recherches faites par Gauss dans le domaine du magnétisme dans les années 1830. La troisième partie est consacrée aux phénomènes électrodynamiques (expérience d'Oersted, interprétation d'Ampère, mesure de courant) ; à l'induction (travaux de Faraday) ; ainsi qu'aux phénomènes thermo-électriques (comme l'effet Peltier) et électrochimiques (théorie de la pile).

---

<sup>7</sup> Voir par exemple : G. Lamé, *Cours de physique de l'École Polytechnique*, Bachelier imprimeur, 1840.

# L'optique, des origines à Édouard Branly

---

## *Les origines, la réflexion et la réfraction de la lumière*

Très tôt, les savants s'intéressent à l'optique car elle permet d'observer le ciel. L'optique est – avec la mécanique – un élément indispensable à l'astronomie, cette dernière alimentant jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle, l'astrologie. Au troisième siècle avant Jésus-Christ, Euclide réalise une synthèse admirable des connaissances de l'époque. Dans son ouvrage, qui fera référence jusqu'à la Renaissance, il introduit la notion de rayon lumineux, les principes de propagation rectiligne et de retour inverse de la lumière, et donne la loi de la réflexion. Le physicien arabe Alhazen (son véritable nom est Ibn al Haytham) franchit, au XI<sup>e</sup> siècle, une nouvelle étape en attribuant à la lumière, contrairement à Euclide, une origine extérieure à l'œil. Au Moyen Âge, l'optique a également des conséquences pratiques : les verres correcteurs de la vision font leur apparition en Italie, dès la fin du XIII<sup>e</sup> siècle. La lunette est présentée également en Italie à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle. Galilée, en 1610, a l'idée d'utiliser ce nouvel instrument pour observer le ciel. Son succès est immense, le père Mersenne résume ainsi la situation : « Galilée ! Qui sera capable de dénombrer ses découvertes ? Avec sa seule lunette, il a presque trouvé plus de chose qu'on n'en connaissait déjà ». De son côté, Kepler donne les bases de l'optique moderne. Il énonce, dans un ouvrage de 1604, les lois de la réflexion et de la réfraction ; cette dernière, sous la forme approchée  $i = nr$  ( $i$  désignant l'angle d'incidence,  $r$  l'angle de réfraction et  $n$  l'indice de réfraction du milieu). Cette forme simplifiée permet à Kepler, en 1610, de construire la théorie des lentilles convergentes et divergentes, la théorie de

### **Descartes vu par Fermat**

Le 1<sup>er</sup> janvier 1662, Fermat écrit à C. de la Chambre, au sujet de la réfraction : « M. Descartes n'a jamais démontré son principe : car outre que les comparaisons ne servent guère à fonder des démonstrations, il emploie la sienne à contre sens, et suppose même, que le passage de la lumière est plus aisé par les corps denses que par les rares, ce qui est apparemment faux ». Fermat conclut ainsi sa lettre : « Le prix de mon travail a été le plus extraordinaire, le plus imprévu et le plus heureux qui fut jamais... J'ai trouvé que mon principe donnait justement et précisément la même proportion des réfractions que M. Descartes a établie ». Fermat ajoute finalement : « Descartes n'aura-t-il pas assez de gloire d'avoir connu les démarches de la nature dans la première vue et sans l'aide d'aucune démonstration ? Je lui cède donc la victoire et le champ de bataille... »

la lunette astronomique de Galilée, et de donner le principe du téléobjectif. La loi exacte de la réfraction est donnée indépendamment en 1620, par le hollandais Snell et en 1637, par Descartes. Toutefois, cette loi ne sera démontrée qu'en 1662 par le mathématicien français Fermat. Tandis que Descartes suppose que la vitesse de la lumière est plus rapide dans l'eau (ou plus généralement, dans un milieu plus réfringent) que dans l'air, Fermat suppose l'inverse.

Le père Grimaldi<sup>8</sup> observe, au début des années 1660, que lorsqu'un fin pinceau de lumière tombe sur un obstacle (fil, cheveux), la lumière cesse de se propager en ligne droite, et que les régions correspondant à la limite entre ombre géométrique et région éclairée présentent des franges alternativement sombres et brillantes. Il appelle *diffraction* ce « nouveau mode de propagation ». Peu après, en 1665, le danois Bartholin découvre la *double réfraction* : l'image d'un objet, vu à travers certains corps transparents (le plus connu étant le spath d'Islande) est dédoublée. L'un des rayons suit la loi ordinaire de la réfraction (rayon ordinaire), tandis que l'autre (rayon extraordinaire), ne la suit pas. Ce phénomène sera interprété par Huygens, en 1677. Le grand Leibniz quant à lui écrit en 1690 : « *Quand j'ai vu que la supposition des ondes sphéroïdales vous sert avec la même facilité à résoudre les phénomènes de la réfraction disdiacastique [double réfraction] du cristal d'Islande, je suis passé de l'estime à l'admiration* ».

## *La vitesse de la lumière*

Dès 1638, Galilée s'interroge sur la validité du principe de propagation instantanée de la lumière : « *Ne suffit-il pas d'ouvrir les yeux, dit Galilée, pour voir des objets aussi éloignés que les étoiles ?* ». Il tente une mesure. Pour cela, il fait placer deux observateurs à environ 1500 mètres l'un de l'autre ; le premier allume une lanterne et déclenche une horloge. Dès perception de la lueur, le second allume sa lanterne, le premier arrête alors immédiatement son horloge lorsqu'il voit cette lanterne s'allumer. Cette expérience ne permet toutefois pas de mesurer la vitesse de la lumière et il conclut, avec justesse, que la lumière se déplace à une vitesse soit infinie, soit trop grande pour être mesurable. Près d'un siècle et demi plus tard, en septembre 1676, Römer annonce à l'Académie des sciences de Paris que l'émergence de Io, premier satellite de Jupiter, lors de sa prochaine éclipse par Jupiter, aura lieu le 9 novembre 1676, avec 10 minutes de retard sur l'heure prévue (5 h 25 min 45 s). Le 9 novembre, les astronomes de l'observatoire de Paris

<sup>8</sup> Francesco Grimaldi (1613-1663) était professeur de mathématiques et de physique au Collège jésuite de Bologne. Son traité d'optique a contribué à inciter Newton à étudier l'optique.

observent l'émergence à 5 h 35 min 45 s, comme prévu par Römer ! Le samedi 21 novembre, jour de la réunion hebdomadaire de l'Académie des sciences, Römer présente une communication dans laquelle il explique que le retard est dû à la vitesse finie de la lumière : « *Le mouvement de la lumière n'est pas instantané, ce qui se fait voir par l'inégalité des immersions et émergences du premier satellite de Jupiter* ». Huygens, dans son traité de la lumière présenté à Paris en 1678, se référant aux travaux de Römer, indique que la lumière est plus de 600 000 fois plus rapide que le son (soit environ 230 000 km/s). Dans ses *Principia*, Newton fait part des résultats de Römer et donne à la vitesse de la lumière, en 1704, la valeur de 243 000 km/s.

Dans son *Traité de la lumière* (1690), Huygens traite de la propagation de la lumière, de la réflexion, de la réfraction, de la réfraction atmosphérique et de la double réfraction du spath d'Islande. Pour Huygens, la lumière est une onde qui se propage sphériquement dans un milieu de référence, l'éther. Le concept d'onde permet à Huygens d'interpréter le fait que deux lumières se croisent sans en être affectées, contrairement à ce qu'il se passerait s'il s'agissait de corpuscules. Il fait une analogie entre la lumière et le son. De plus, il montre que la nature ondulatoire de la lumière impose qu'elle se propage plus vite dans le vide (« l'éther ») que dans n'importe quel autre milieu. Plus le milieu est réfringent (c'est-à-dire, plus son indice de réfraction est grand) et moins la lumière s'y propage vite. Ainsi, la vitesse de la lumière doit être plus grande dans l'air que dans l'eau.

Tandis que Huygens suppose que la lumière est une onde, Newton, à la même époque, attribue à la lumière une nature corpusculaire. Il développe sa théorie des « accès » qu'il introduit ainsi : « *Pour que les rayons de lumière aient des accès alternés de facile réflexion ou de facile transmission, nihil aliud opus est, il suffit ainsi que ces rayons soient de petits corpuscules, qui, par leur puissance attractive, ou par quelque autre force, excitent des vibrations dans le milieu sur lesquels elles agissent* ». À l'inverse de la théorie ondulatoire, la théorie corpusculaire de la lumière impose que sa vitesse soit plus grande dans l'eau que dans l'air.

Pendant près d'un siècle, la théorie corpusculaire sera prédominante. Le succès de la théorie de l'attraction universelle est tel que, à l'image de Laplace, l'attraction devient le processus destiné à interpréter la réflexion, la réfraction et la diffraction. Ainsi, Laplace indique, en 1793, que la « lumière consiste en une émission de corpuscules ». Seules quelques voix isolées, comme celle d'Euler, se font entendre pour défendre la théorie ondulatoire de Huygens.

## L'optique de Newton vu par Einstein

Einstein, père du photon, commente ainsi, dans une préface à une réédition du traité d'optique de Newton, l'œuvre du savant anglais : « *Heureux Newton, heureuse enfance de la science ! Celui qui a du temps et de la tranquillité peut, en lisant ce livre, revivre les événements merveilleux que connut le grand Newton dans sa jeunesse. La nature était pour lui un livre ouvert dont il pouvait lire les lettres sans effort. Les concepts qu'il employa pour mettre de l'ordre dans la matière expérimentale semblaient découler spontanément de l'expérience elle-même, de belles expériences qu'il alignait comme des jouets et qu'il décrit avec une affectueuse richesse de détails. Il regroupa en une seule personne l'expérimentateur, le théoricien, le mécanicien et – ce qui n'est pas de moindre importance – l'artiste dans l'exposé. Il se tient devant nous, fort, certain et seul : sa joie dans la création et sa précision minutieuse sont évidentes dans chaque mot et dans chaque figure. La réflexion, la réfraction, la formation d'images par les lentilles, le fonctionnement de l'œil, la décomposition spectrale et la recombinaison des différentes lumières, l'invention du télescope à réflexion, les premiers fondements de la théorie des couleurs, la théorie élémentaire de l'arc-en-ciel défilent devant nous en procession, et viennent enfin, ses observations des couleurs des lames minces, origine du prochain grand progrès théorique, qui dut attendre plus de cent ans, la venue de Thomas Young* ».

### *Onde ou corpuscule ?*

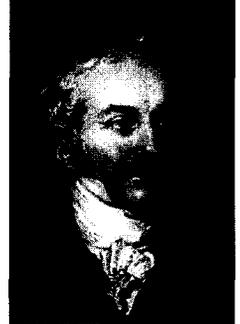
En janvier 1800, le physicien Young remet en question l'interprétation corpusculaire de la lumière. En observant les couleurs des bulles de savon, il reprend le dispositif des *anneaux de Newton*<sup>9</sup> et, de l'observation des franges qui se dessinent lorsqu'il introduit de l'eau dans le dispositif, il déduit que la vitesse de la lumière dans l'eau est plus faible que dans l'air, ce qui est la conséquence, comme l'a déjà montré Huygens, de la nature ondulatoire de la lumière. En refaisant l'expérience de la diffraction par un fil, il s'aperçoit que les franges disparaissent si l'on masque un côté du fil, contrairement à l'interprétation de Newton selon laquelle, seules les franges *du même côté* que celui du fil masqué doivent disparaître. C'est alors qu'il a l'idée de faire sa fameuse expérience des *trous d'Young*. Lorsque de la lumière

<sup>9</sup> Les anneaux de Newton peuvent être observés en disposant une lentille plan-convexe sur une surface de verre plane. On appelle ainsi ce dispositif car Newton l'a utilisé pour étudier les couleurs. À présent, il est surtout utilisé pour présenter le phénomène d'interférences.

est diffractée par deux trous percés dans un écran, des franges alternativement sombres et brillantes apparaissent dans la zone d'intersection des deux faisceaux lumineux. *De la lumière ajoutée à de la lumière peut donner de l'obscurité !* Il suffit par ailleurs, d'occulter un seul des trous pour que toutes les franges disparaissent.

## Le phénomène Young

Charles Fabry dit dans une conférence faite en 1927, à l'occasion du centenaire de la mort de Fresnel : *« C'est une belle et curieuse figure que celle de Thomas Young. L'un des esprits les plus vastes que l'espèce humaine ait produits. D'une extraordinaire précocité (on prétend qu'il savait lire à deux ans), il se rend maître, sans peine, de toutes les connaissances humaines et, ce qui est plus remarquable, apporte dans toutes, des vues originales et profondes »*. Comme Branly, Young a été à la fois physicien et médecin (voir chapitre 1).

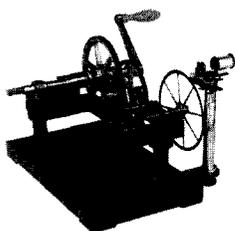


Thomas Young  
(1773-1829).

L'étape suivante est la découverte, par Malus, de la polarisation. Ce dernier, après avoir été élève de l'École du Génie de Mézières, entre à Polytechnique où il devient examinateur puis directeur des études. Un soir de 1808, à la tombée du jour, il observe depuis sa maison située rue Denfert (dans l'Observatoire de Paris), à travers un cristal de calcite, la double image du soleil couchant reflétée par les fenêtres du palais du Luxembourg. En tournant la calcite dans son plan, il remarque que l'une puis l'autre image s'éteignent. On savait déjà, depuis Huygens, que la lumière qui traverse successivement deux cristaux de spath d'Islande n'est pas divisée en deux faisceaux lors de la deuxième traversée. Malus vient de découvrir alors, que de la lumière, qui a subi une réflexion, peut également, sous certaines orientations, ne pas être divisée en deux faisceaux à la traversée d'un milieu biréfringent. Malus écrit dans son mémoire de 1808 : *« Si l'on fait tomber un faisceau de lumière sur la surface de l'eau stagnante, et sous l'angle de 52°54' avec la verticale, la lumière réfléchie a tous les caractères d'un des faisceaux produits par la double réfraction d'un cristal »*. Par analogie avec les corps magnétiques, il affirme que les corpuscules lumineux sont dotés de pôles et appelle « polarisée » la lumière dont les particules sont toutes orientées uniformément. Malus découvre donc la polarisation grâce au phénomène de polarisation par réflexion. Dans l'expérience fortuite qui a été décrite, les fenêtres du Luxembourg jouent le rôle de polariseur et la calcite celui d'analyseur. En répétant cette expérience, Malus établit la loi qui porte son nom, donnant l'intensité du faisceau de lumière passant à travers deux polariseurs faisant entre eux un angle  $\theta$  (en appelant  $I_0$  l'intensité du faisceau avant les polariseurs et  $I$  celle après les polariseurs, la loi de Malus s'écrit :  $I \sim I_0 \cos^2 \theta$ ).

Fresnel, un autre élève de l'École Polytechnique (admis en 1804 à l'âge de 16 ans), suit les enseignements de Monge, Poisson et Legendre. En 1815, il interprète la diffraction en terme d'ondes. On ne peut mieux résumer l'œuvre de Fresnel qu'en citant le discours que le physicien hollandais Hendrick Antoon Lorentz a fait en 1927, lors des cérémonies du centenaire de la mort de Fresnel : « *De quelque nationalité ou de quelque âge que nous soyons, nous l'honorons tous comme un des grands maîtres de la science, comme un de ceux à qui il a été donné de pénétrer plus profondément et plus loin que les autres les secrets de la nature, comme un de ceux dans lesquels a brillé avec le plus vif éclat le génie inventeur et créateur [...] Son œuvre, d'une belle unité, mais aussi, d'une admirable largeur, se résume ainsi : il a fondé, presque dans sa forme actuelle, la science de l'optique. Se développant suivant l'impulsion qu'il avait donnée, cette science s'est singulièrement élargie. Nous devons à Fresnel d'avoir compris, d'avoir pu mettre à sa place l'immense domaine des radiations, qui n'est pas seulement l'agent de nos sensations visuelles, mais dont la physique moderne fait un des éléments essentiels de l'Univers* ».

Les travaux de Young, de Fresnel et d'Arago semblent bien montrer la suprématie de l'interprétation ondulatoire de la lumière. Mais jusqu'en 1820, ils doivent faire face à la farouche opposition de leurs aînés newtoniens comme Laplace, Biot ou Poisson. Une expérience est susceptible de mettre définitivement fin à cette polémique. D'après la théorie corpusculaire de la lumière, celle ci doit se déplacer plus vite dans l'eau que dans l'air, alors que dans le cadre de la théorie ondulatoire c'est l'inverse qui doit se produire. En 1849, deux physiciens français, Fizeau et Foucault décident de s'attaquer à ce « problème crucial de l'optique ». Mais, subitement, Fizeau veut faire cavalier seul car avant de continuer plus avant la recherche des vitesses relatives de la lumière, il entend se consacrer à la détermination exacte de sa vitesse absolue. Il va être le premier à mesurer la vitesse de la lumière par une méthode non astronomique, ce qui fait dire à Arago « *Fizeau nous rendra Fresnel* ».



Mesure de la vitesse de la lumière par Fizeau par la méthode de la roue dentée.

Nous sommes en juillet 1849. Fizeau, depuis la maison de son père à Suresnes, vise un point lumineux à Montmartre, il s'agit en fait, d'un miroir qu'il a placé quelques heures plus tôt dans la maison d'un ami, et qu'il éclaire, depuis Suresnes avec une lunette fortement illuminée par une lampe à « gaz oxygène et hydrogène ». Le cœur du dispositif est constitué d'une roue dentée comportant 720 dents (p) très régulières et tournant rapidement (12,5 tours par seconde : n), la lumière qui passe entre deux dents s'échappe du dispositif, vient frapper le miroir placé à Montmartre (à 8633 m de Suresnes : d) et revient. Convenablement réglé, le temps mis par la lumière pour faire son aller-retour, coïncide avec la durée de déplacement d'une demi dent, la lumière est alors

interceptée, l'image s'éteint et l'on en déduit sa vitesse  $c$  ( $c = 4 \text{ dnp}$ ) soit  $315\,000 \text{ km.s}^{-1}$ . Le 23 juillet 1849, Arago lit à l'Académie, le texte que Fizeau lui-même a transmis : « Je suis parvenu à rendre sensible la vitesse de propagation de la lumière par ma méthode qui me paraît fournir un moyen nouveau d'étudier avec précision, cet important phénomène ». Après description du dispositif, il conclut que sa méthode « fournit une valeur de la vitesse de la lumière peu différente de celle qui est admise par les astronomes ». Foucault rend hommage à son ami en écrivant le 20 décembre, dans le journal des débats : « La publication de ce travail est un grand événement de la science ».

## *L'expérience cruciale de l'optique*

En 1850, c'est au tour de Foucault d'entrer en scène, cette fois pour faire une mesure de la vitesse relative de la lumière, dans l'air et dans l'eau, selon le principe d'une expérience qu'Arago a tenté d'effectuer dès 1838. Un faisceau de lumière tombe sur une mire transparente puis sur un miroir tournant à grande vitesse (800 tours par seconde) qui le dirige alors vers un second miroir fixe et distant de 4 m du précédent. Après réflexion, la lumière revient vers le miroir mobile, qui entre-temps, s'est déplacé d'un angle très faible, l'image de la mire étant décalée d'autant. Le dispositif est également composé d'une « seconde voie » : entre un autre miroir fixe et le même miroir mobile est interposée une colonne d'eau contenue dans un long tube. Ainsi, est-il possible de comparer la vitesse de la lumière dans l'air (première voie) et dans l'eau (seconde voie). Foucault réalise l'expérience le 27 avril 1850, son mémoire est lu le 6 mai à l'Académie : « Ce mémoire ne contient, en réalité, qu'un seul résultat : c'est la réussite, par des moyens nouveaux, de l'expérience décisive imaginée depuis plusieurs années par M. Arago pour prononcer définitivement entre les deux théories rivales de la lumière [...] toujours la lumière se trouve retardée dans son passage à travers le milieu le plus réfringent ». Ainsi, l'expérience cruciale de l'optique a-t-elle donné son verdict : la vitesse de la lumière est moindre dans les liquides que dans l'air ou le vide. La théorie ondulatoire de la lumière triomphe définitivement.

## *La découverte des rayonnements infrarouge et ultraviolet*

Herschel est connu à la fois comme musicien et comme astronome ! Il découvre en 1781, une nouvelle planète, Uranus, la première à être découverte depuis l'antiquité. En physique, son nom reste attaché à la découverte du rayonnement infrarouge. En 1800, Herschel désire



Herschel découvre  
l'infrarouge.

connaître la quantité de chaleur qui passe derrière les différents filtres colorés qu'il utilise pour observer le soleil. Il décompose la lumière du soleil à l'aide d'un prisme. Il dispose trois thermomètres (dont les extrémités sont noircies pour obtenir une meilleure absorption de la chaleur), l'un est placé sur une couleur du spectre, les deux autres le sont en dehors et servent de référence. Comme attendu, le thermomètre placé dans le spectre et recevant une partie de la lumière solaire est plus chaud que les thermomètres de référence. Herschel mesure patiemment l'échauffement dû aux différentes couleurs spectrales : violet, bleu, vert, jaune, orange et rouge. Il s'aperçoit que la température augmente à mesure que l'on se déplace du violet au rouge. Cette constatation l'incite à faire également la mesure au-delà du rouge, dans la région du spectre qui n'est plus visible. À sa grande surprise, il constate que c'est dans cette région que la température est la plus élevée. Il appelle ces nouveaux rayons « rayons caloriques », ce n'est que plus tard qu'ils seront baptisés rayons infrarouges (c'est-à-dire, avant le rouge). Fort de cette découverte, Herschel réalise sur les rayons caloriques les expériences classiques d'optique : réflexion, réfraction, absorption, transmission, etc. et constate que leur comportement est similaire à celui de la lumière visible.

Apprenant la découverte d'Herschel, Ritter décide en 1801, de mener des expériences afin de savoir si de l'autre côté du spectre (en deça du violet) il n'existerait pas non plus un nouveau type de rayonnement. Il utilise pour cela du chlorure d'argent qui a la propriété de se noircir lorsqu'il est exposé à la lumière (c'est ce que l'on utilise dans les pellicules photographiques). Il savait que la lumière bleue avait plus d'effet que la lumière rouge sur le chlorure d'argent. Aussi, décide-t-il de mesurer l'effet des différentes couleurs sur ce produit. Pour cela, il procède de façon similaire à Herschel. Il décompose la lumière du soleil à l'aide d'un prisme et place du chlorure d'argent à différents endroits du spectre. Il observe en effet que plus la lumière se rapproche du violet et plus le chlorure d'argent est noirci. Il place alors le produit au-delà du violet, dans une région du spectre invisible à l'œil. Il découvre qu'à cet endroit le chlorure d'argent devient encore plus noirci. Il en déduit qu'il existe un rayonnement plus réfracté que le violet qu'il appelle, compte tenu des conditions de la découverte, rayonnement chimique et que l'on appellera ensuite, rayonnement ultraviolet.

### *Les débuts de la spectroscopie*

L'année suivante (1802), Wollaston découvre des lignes sombres dans le spectre du soleil. En 1814, l'Allemand Fraunhofer montre que ces

raies sont dues à la source et non à l'optique. Grâce au nouveau spectroscope (à réseau) qu'il met au point, il réussit à observer 576 raies d'absorption dans le spectre du Soleil. Il faut toutefois attendre 1859, pour que les physiciens Kirchhoff et Bunsen introduisent l'analyse spectrale. Grâce à un spectroscope à prisme, ils analysent, de façon systématique, la lumière produite par des substances en combustion. Ils établissent que chaque élément chimique possède un spectre d'émission caractéristique et absorbe de manière sélective la lumière suivant les mêmes longueurs d'onde. Il s'en suit la découverte de nouveaux éléments :

- en 1860 : Bunsen et Kirchhoff découvrent le césium (Cs, de Caesium = bleu du ciel) ;
- en 1861 : Bunsen et Kirchhoff découvrent le rubidium (Rb, de Rubidus = rouge foncé / rubis) ;
- en 1861 : Crookes découvre le thallium (Tl, de Tallium = vert intense) ;
- en 1863 : Peich découvre l'indium (In, Indigo).



Bunsen et Kirchhoff.

L'analyse spectrale connaîtra un succès retentissant le 18 août 1868, lors de l'éclipse du Soleil qui durera 6,5 min et permettra à Janssen de découvrir une nouvelle raie dans le spectre des protubérances, raie que Norman Lockyer attribuera à un corps simple inconnu sur Terre qu'il baptisera « hélium » (de Helios = soleil) et qui ne sera décelé qu'en 1895, dans l'atmosphère terrestre.

## *L'enseignement de l'optique lorsque Branly est étudiant*

Continuons à feuilleter le cours de physique de l'École Polytechnique, à l'époque où Édouard Branly est étudiant en classe préparatoire. La polarisation, le phénomène de phosphorescence, les « rayons caloriques » et les « rayons chimiques » y tiennent une place importante. Comme dans l'ensemble de ce cours, les applications pratiques ne sont pas en reste, en particulier, un paragraphe spécifique est consacré au daguerréotype (ancêtre des appareils photographiques). Les phénomènes atmosphériques (aurores boréales) sont également évoqués.

### **Le cours de physique de Branly**

Édouard Branly a rédigé un *Cours élémentaire de physique*, dont la première édition remonte à 1900. Ce livre a connu un grand succès avec sept éditions et près de 30 000 exemplaires vendus. Ce cours traite des différents domaines de la physique : mécanique, thermodynamique (appelé « chaleur »), acoustique, optique et électricité. L'ouvrage est très clair et très agréable à lire. Chaque notion fait

l'objet d'un petit paragraphe (en général de moins d'une page), très souvent illustré par un schéma (ainsi, dans la dernière édition, qui compte 560 pages, il n'y a pas moins de 750 paragraphes numérotés et 640 figures). Les notions fondamentales sont introduites, elles sont richement illustrées par des exemples d'applications. Ainsi, on trouve exposé le principe des aérostats, des ascenseurs hydrauliques, des turbines à vapeur, des phonographes, de la photographie, des paratonnerres, de la télégraphie sans fils et de nombreuses autres « technologies » contemporaines. Bien que dans ses cours Branly n'hésite pas à avoir recours à un formalisme mathématique élaboré, son livre, qualifié d'élémentaire, n'y fait pas appel. Les différentes notions sont introduites de façon très physique, elles sont toujours directement liées à l'expérience.

## L'électricité et les expositions universelles

---

### *Première exposition universelle : Londres 1851*

1851 est l'année de la première exposition internationale et universelle. Cette dernière se déroule à Londres, en pleine révolution industrielle et en pleine période coloniale. Malgré la relativement faible surface de l'exposition (il n'y a qu'un seul bâtiment, le Palais de Cristal), elle abrite près de 14 000 exposants et accueille 6 millions de visiteurs. L'exposition porte sur le double thème de l'innovation industrielle et de l'exotisme rapporté des colonies. L'exposition de Londres est consacrée aux progrès accomplis par l'homme du XIX<sup>e</sup> siècle. On peut y voir de l'ancien (galerie médiévale) aussi bien que du moderne (chambre de machines). Le caractère colonial est très présent. L'artisanat amérindien côtoie les étoffes des Indes ou les chapeaux d'Australie. Cette exposition marque le début d'une longue série : il y en a pratiquement une, voire deux, par an. C'est l'occasion de faire découvrir au public les civilisations ainsi que les progrès dans les arts et dans les sciences et techniques (voir encadré sur les expositions universelles de la création de 1851 à 1905). Même si de nos jours, le rythme est moins soutenu, des expositions universelles sont toujours organisées, la dernière en date ayant eu lieu en 2005 (voir encadré sur les expositions universelles de 1985 à 2005). En 1851, le domaine de l'électricité est encore extrêmement peu développé. L'application la plus marquante est le télégraphe électrique qui se développe alors rapidement. En Angleterre, plusieurs milliers de kilomètres de ligne sont déjà installés. Le câble télégraphique sous-marin reliant l'Angleterre et la France vient d'être installé. Cette année est également

marquée par l'invention, par Ruhmkorff, de la bobine d'induction (voir encadré du chapitre 1), qui grâce aux hautes tensions qu'elle permet de délivrer, sera la source d'un grand nombre de découvertes.

## *L'exposition universelle de Paris de 1855*

Napoléon III veut montrer à l'Angleterre que la France peut également faire une exposition grandiose. L'exposition universelle de Paris a lieu du 15 mai au 31 octobre 1855, sur les Champs Élysées. Un palais est dédié à l'industrie, un autre est consacré aux arts. Au total, 17 000 exposants sont présents et le nombre de visiteurs atteint 5 millions. Si l'on excepte le fait que la France a adopté le télégraphe de Morse depuis 1854, aucune avancée notable n'est à signaler dans le développement de l'électricité depuis l'exposition de 1851.

### Liste des expositions universelles de 1851 à 1905

- 1851 : Londres
- 1853 : Dublin
- 1853-1854 : New York
- **1855 : Paris** (Exposition Universelle des Produits de l'Agriculture, de l'Industrie et des Beaux-Arts)
- 1860 : Besançon
- 1862 : Londres
- 1865 : Dublin
- 1865 : Porto
- **1867 : Paris** (exposition universelle de Paris)
- 1868 : Le Havre (Exposition Maritime Internationale)
- 1871 : Londres
- 1872 : Lyon (Exposition Universelle et Internationale)
- 1873 : Vienne
- 1874 : Londres
- 1875 : Santiago du Chili
- 1876 : Philadelphie
- **1878 : Paris** (exposition universelle de Paris)
- 1879 : Sydney
- 1880 : Sydney
- 1881 : Melbourne
- 1881 : Atlanta
- 1881 : Paris (Exposition Internationale de l'Électricité)
- 1882 : Munich (Exposition Internationale de l'Électricité)
- 1882 : Christchurch (Nouvelle-Zélande)
- 1883 : Amsterdam
- 1883-1884 : Boston
- 1883-1884 : Calcutta
- 1884-1885 : New Orleans
- 1885 : Anvers
- 1885 : Londres
- 1886 : Londres
- 1886 : Edimbourg
- 1887-1888 : Adelaide (Australie)
- 1888 : Barcelone
- 1888 : Glasgow
- 1888-1889 : Melbourne (Australie)
- **1889 : Paris** (exposition universelle)
- 1889-1890 : Dunedin (Nouvelle-Zélande)
- 1890 : Edimbourg

- 1891 : Francfort
- 1892 : Gènes
- 1893 : Chicago
- 1894 : Anvers
- 1894 : Lyon
- 1894 : Londres
- 1894 : San Francisco
- 1894-1895 : Hobart (Australie)
- 1895 : Amsterdam
- 1895 : Atlanta
- 1895 : Bordeaux
- 1896 : Rouen
- 1896 : Berlin
- 1896 : Budapest
- 1897 : Bruxelles
- 1897 : Guatemala City
- 1897 : Nashville
- 1897 : Stockholm
- 1898 : Omaha (États-Unis)
- 1899 : Côme (Exposition Internationale de l'Électricité)
- **1900 : Paris** (Exposition Universelle et Internationale de Paris)
- 1901 : Buffalo
- 1901 : Glasgow
- 1901 : Turin
- 1902-1903 : Hanoï
- 1904 : Saint-Louis (États-Unis)
- 1905 : Liège
- 1905 : Portland

### *L'exposition universelle de Paris de 1867*

C'est de nouveau Napoléon III qui inaugure la seconde exposition universelle de Paris en avril 1867 (l'exposition aura lieu du 1<sup>er</sup> avril au 3 novembre), soit douze ans après la précédente. Son thème est l'histoire du travail, de l'âge de pierre jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle. Elle a lieu cette fois sur le Champ de Mars, dans le Paris modelé par le Baron Haussmann. L'entreprise est gigantesque : plus de 52 000 exposants (dont 30 % sont français), 41 pays présents avec chacun un pavillon national leur permettant d'exprimer leur architecture locale. L'exposition permet également aux visiteurs de se rendre compte des progrès de la technique avec des nouveautés comme l'ascenseur hydraulique (d'Otis) ou le béton armé. Il est très probable qu'Édouard Branly, qui était alors étudiant à l'École Normale Supérieure, ait visité cette exposition majeure.

### *L'exposition d'électricité de Vienne de 1873*

L'électricité s'est enrichie d'une découverte majeure depuis l'exposition de Paris de 1867 : la dynamo. On doit cette découverte à un humble menuisier belge installé à Paris, amateur passionné de mécanique et d'électricité, véritable génie expérimental : Zénobe Gramme. Il fait part de sa découverte dans le *Compte Rendu de l'Académie des sciences* du 17 juillet 1871 comme suit : « [...] *En un mot, on peut obtenir de cette machine [la dynamo], tout ce qu'on obtient avec la pile. Il y a donc lieu de*

*penser qu'elle pourra lui être substituée avec avantage dans beaucoup de cas, soit dans les applications industrielles, soit dans les recherches scientifiques ».* Deux ans plus tard, une autre découverte de grande importance est faite, lors de l'exposition d'électricité de 1873 à Vienne. L'ingénieur Hippolyte Fontaine s'aperçoit, par un heureux hasard, que la dynamo de Gramme est réversible. La dynamo transforme un mouvement mécanique (produit par exemple, par une manivelle) en un courant électrique. Fontaine découvre qu'un courant électrique permet de produire une action mécanique : le moteur électrique est né. Les circonstances de cette découverte méritent d'être rapportées. Lors de l'exposition de Vienne, une machine de Gramme est installée pour fournir de l'électricité à différentes expériences d'éclairage. Par prudence, une seconde machine est placée en réserve, au cas où la première serait défaillante. Alors que la première machine de Gramme, entraînée par une machine à vapeur, fournit son courant, un ouvrier fait une erreur de manipulation et la branche sur la machine de réserve. À sa grande stupéfaction, Fontaine constate que la seconde machine se met alors en mouvement. Le courant qui lui est injecté produit un mouvement mécanique ! Ainsi, est réalisé le premier transport à distance de la force motrice grâce à l'électricité. En pratique, pour transporter l'électricité sans trop de perte, il faut la produire à une tension élevée. Cela est possible en utilisant un courant alternatif qui permet à son tour, de faire appel à un transformateur<sup>10</sup>.

## La théorie et la pratique

*« J'étais assis, raconte d'Arsonval, entre Zénobe Gramme et Hippolyte Fontaine lors d'une conférence savante sur les dynamos faite par le physicien Froelich. À la fin de la conférence, où il avait consciencieusement dormi, le « père Gramme » se réveilla et contempla avec effroi le tableau noir couvert d'équations et barré par les signes allongés des intégrales :*

*- Ah ! docteur, me dit-il, je n'aurais jamais inventé ma machine s'il avait fallu m'embarrasser de tous ces portes-manteaux ! »*

---

<sup>10</sup> Un transformateur est constitué d'un anneau en fer doux sur lequel sont enroulées  $n_1$  spires sur l'une de ses parties (circuit primaire) et  $n_2$  spires sur la partie en regard (circuit secondaire). La tension  $V_2$  recueillie aux bornes du secondaire est reliée à la tension  $V_1$  appliquée aux bornes du primaire par la simple relation :  $V_2 = V_1 \times n_2 / n_1$ . Le principe résulte d'une application directe de la loi de l'induction de Faraday.

## *L'exposition universelle de Paris de 1878*

Pour montrer que la France s'était complètement remise de la guerre de 1870, Paris organise de nouveau une exposition universelle en 1878. De tous les points de vue, c'est la plus grande qui ait été organisée jusqu'à là. L'exposition a lieu des deux cotés de la Seine : d'une part, sur le Champ de Mars, d'autre part au Trocadéro, construit pour l'occasion. Les deux parties étaient reliées entre elles par le pont d'Iena élargi. L'exposition couvre une surface de près de 270 000 m<sup>2</sup>. Comme en 1867, il y a les exposants français (qui occupent environ la moitié de la superficie totale) et les pavillons étrangers. Durant les six mois de l'exposition (mai à octobre), il n'y aura pas moins de 13 millions de visiteurs.

## *L'exposition internationale d'électricité de 1881*

En 1881 a lieu à Paris la première exposition internationale d'électricité ainsi que le congrès des électriciens. Eleuthère Mascart, véritable chef d'orchestre de l'opération, réussit grâce à son grand tact, à trouver un accord entre les électriciens de toutes les nationalités, sur de nouvelles unités internationales. L'exposition internationale d'électricité est à la fois scientifique et vulgarisatrice. La lampe à incandescence d'Edison est à l'honneur. Edison avait eu l'intuition qu'en faisant passer un courant électrique dans un filament, l'augmentation de température qui en résulterait le rendrait lumineux. Encore fallait-il que ce filament résiste bien à la chaleur d'une part, et que d'autre part, il ne se consume pas. Pour la première condition, il opère avec opiniâtreté (un trait de caractère que l'on retrouve chez Édouard Branly) et essaye des milliers de substances : papier carbonisé, coton carbonisé, fibres végétales de toutes espèces, etc. Un bambou du Japon carbonisé se révéla particulièrement adapté. L'essai concluant, réalisé dans son laboratoire de Menlo-Park le 21 octobre 1879, marque le début de la lampe à incandescence. Rapidement, le bambou du Japon est remplacé par de la soie artificielle, puis par un métal tréfilé et enfin, par du tungstène, élément qui est encore utilisé de nos jours. Lors de l'exposition de Paris de 1881, Edison ne présente pas moins de mille lampes alimentées par une dynamo. L'exposition de 1881 est également l'occasion de montrer que l'on peut produire du courant électrique, le véhiculer et l'utiliser pour produire de la force mécanique. La génératrice est distante de la motrice d'une centaine de mètres. Pendant quelques jours, on met ainsi en mouvement des ascenseurs, des machines à coudre, des tours et autres outils de l'industrie. C'est également l'occasion de montrer l'utilisation de l'électricité dans les moyens de transport. Siemens, après avoir réalisé de nombreux travaux et recherches dans le domaine de

l'électricité, construit en 1879 la première locomotive électrique. En 1881, il réalise un omnibus électrique. Il expose à Paris, durant l'exposition de 1881, sa toute dernière invention : le tramway électrique.

Arsène d'Arsonval, grand ami d'Édouard Branly prévoit en cette année 1881, le formidable essort qu'offre l'utilisation de l'électricité. Il est cette année-là, l'un des principaux animateurs du Congrès International des Électriciens qui unifia le système des unités. « *Canaliser l'électricité, dit d'Arsonval, c'est bien démocratiser la force. Mais il y a plus. Transporter la force à grande distance, c'est pouvoir se passer du charbon dont les provisions s'épuisent, et utiliser les forces naturelles jusqu'ici perdues. Dans un avenir prochain, nous verrons les eaux de nos fleuves, les vents ou les marées mettre en mouvement de puissantes machines électriques d'où partira un réseau*

Lorsqu'un de ses amis physiciens reçoit Siemens à l'Académie des sciences de Berlin, il lui dit : « *Tu es le James Watt de l'électromagnétisme* ».

### **Le Nobel partagé par Edison et Tesla : une fausse nouvelle !**

Le journal *The Electrical World* de New York, annonce le 13 novembre 1915 que le prix Nobel de physique de l'année 1915 est attribué conjointement à Thomas Edison et Nicolas Tesla. L'article fait part des travaux de ces deux savants et de leur mérite respectif. La nouvelle est également annoncé dans le *Literary Digest*. Pourtant le lendemain, 14 novembre, le bureau de Stockholm de l'agence Reuter's publie, de la part du comité Nobel, un démenti : le prix est attribué à William Henry Bragg et à son fils William Lawrence Bragg (Les Bragg père et fils obtiennent le nobel « *pour la valeur de leur contribution à l'étude des structures des cristaux au moyen des rayons Röntgen (c'est-à-dire des rayons X)* »). Il faut noter que William Lawrence Bragg reste à ce jour, le plus jeune lauréat du prix Nobel, toutes disciplines confondues : 25 ans ! Le comité Nobel ne donnera aucune explication sur cette affaire. Certains auteurs ont indiqué qu'Edison aurait refusé de partager le prix avec son concurrent Tesla, mais cette interprétation ne semble fondée sur aucun document.

Albert Einstein qualifiait Edison de « plus grand inventeur de tous les temps ». Il a à son actif : le microphone, le phonographe, le télégraphe duplex, la lampe à incandescence, le mégaphone, le kinétoscope, etc. Edison totalise plus de 1000 brevets !

De son côté, Behrend, président de l'American Institute of Electrical Engineers (ancêtre de l'IEEE) déclare au sujet de Tesla : « *Si nous devions saisir et éliminer de notre monde industriel les résultats des travaux de monsieur Tesla, les roues de l'industrie s'arrêteraient, les trains seraient immobilisés, nos villes seraient jetées dans la pénombre et nos usines seraient mortes [...] Son nom marque une époque dans l'avancement de la science électrique. De ce travail, jaillit une révolution.* » Tesla a à son actif plus de 700 brevets !

*de fils sillonnant le pays et distribuant sur son parcours la force à l'industrie et à l'agriculture. Rappelez-vous que grâce à la science, l'impossibilité d'hier sera la banalité de demain. »*

Deux ans après l'exposition internationale d'électricité de 1881, la Société Internationale des Électriciens (SIE) est créée (25 août 1883)<sup>11</sup>, et Eleuthère Mascart en prendra la direction. La fée électricité est en pleine croissance. « *Les électriciens !* affirme Théodore de Montel en 1880, *voilà un nouveau mot, un mot que l'on pourrait taxer d'opportuniste car il résulte du développement considérable qu'ont pris depuis une quarantaine d'année les applications électriques.* » La France se dote en 1888, d'un Laboratoire Central d'Électricité<sup>12</sup>, placé également sous la direction de Mascart. On y fait des conférences et finalement, une École d'application, qui « *a pour but de donner aux ingénieurs les connaissances pratiques qu'exige l'emploi étendu de l'électricité dans l'industrie* », ouvre le 3 décembre 1894. Paul Janet prendra l'année suivante la direction de cette école qui sera appelée École Supérieure d'Électricité, le 30 décembre 1896. Le recrutement est varié : certains élèves sont admis sur concours, d'autres viennent de Polytechnique, Centrale, les Ponts, l'École Supérieure de Télégraphie, les Arts et Métiers (s'ils en sont médaillés), d'autres encore sont recrutés à la faculté des sciences au niveau de la licence, etc. La scolarité, jusqu'en 1938, sera d'un an. En 1912, une section radiotélégraphie est ouverte, elle est placée sous la responsabilité du commandant Ferrié.

## *L'exposition internationale d'électricité de Munich de 1882*

Le premier transport électrique, rendu possible par l'heureuse constatation de Fontaine lors de l'exposition de Vienne de 1873 sera réalisé lors d'une autre exposition internationale d'électricité, celle qui se tient à Munich, en 1882. Marcel Desprez utilise deux machines Gramme et une ligne télégraphique. La première machine Gramme est installée à Miesbach, petite localité située à 57 km de Munich. Grâce à un transformateur, on transmet le courant produit sous haute tension dans la ligne télégraphique. Ce courant alimente la seconde machine Gramme, placée au centre de l'exposition, laquelle actionne une fontaine ! C'est véritablement le point de départ de la distribution électrique. De son côté, Edison en 1882, crée la première centrale

<sup>11</sup> La SIE deviendra en 1918, la Société Française des Électriciens (SFE), puis suite à la fusion avec la SFER (Société Française des Électroniciens et des Radioélectriciens), elle deviendra, en 1972, la SEE (Société des Électriciens et des Électroniciens).

<sup>12</sup> Le Laboratoire Central d'Électricité deviendra en 1942, le Laboratoire Central des Industries Électriques (LCIE).

électrique capable d'alimenter cinq cents abonnés installés dans un rayon de quelques centaines de mètres (Edison utilise du courant continu, d'où la faible portée du transport. Au-delà, les pertes deviennent vite importantes). En 1883, on relie, par du courant continu, Vizille et Grenoble (14 km), puis Creil et Paris (ligne de 56 km transportant un courant continu sous 6000 V). Les premières centrales à courant alternatif commenceront à voir le jour en 1887 et s'imposeront progressivement.

## *Les expositions universelles de Paris 1889 et de 1900*

Pour les cent ans de la révolution française, la France veut célébrer l'événement par une nouvelle et grandiose exposition universelle. C'est l'occasion pour elle de prouver qu'elle est une grande puissance. L'exposition a lieu à Paris du 5 mai au 31 octobre 1889. L'événement a lieu cette fois au Champs de Mars, au Trocadero, sur le quai d'Orsay, sur une partie de la Seine et sur l'esplanade des Invalides, au total 96 hectares (plus de trois fois la superficie de l'exposition de 1878). On dénombre plus de 60 000 exposants (dont 55 % sont français). La tour Eiffel sera naturellement le symbole de cette exposition. L'utilisation de l'électricité est très présente, elle change les habitudes. Grâce à l'éclairage électrique, l'exposition ouvre ses portes jusque vers minuit. Les ponts, les jardins, les pavillons et la tour Eiffel sont illuminés (cette dernière est enveloppée de cordons lumineux et possède, à son sommet, un puissant phare). Paris devient la « Ville Lumière ». Le visiteur peut découvrir le Grand Palais, le Palais des Beaux-Arts, la galerie des Machines. Le succès est total : 30 millions de visiteurs auront pu découvrir cette exposition exceptionnelle.

**Le métro parisien est le huitième dans le monde, il succède à ceux de Londres, New York, Istanbul, Chicago, Budapest, Glasgow et Vienne.**

1900 est l'année de l'« exposition universelle et internationale de Paris ». Cette dernière a lieu du 15 avril au 12 novembre. Le thème choisi est tout naturellement « Le bilan d'un siècle », mais l'électricité est sacrée reine de l'exposition. À Paris, c'est l'année de tous les projets : c'est le début des travaux du Métropolitain (dont la première ligne sera inaugurée pendant l'exposition), et la préparation des Jeux Olympiques de 1900. La Seine est l'axe principal de l'exposition, les espaces utilisés sont semblables à ceux de 1889 avec en plus, les Champs Élysées et l'Esplanade des Invalides : la superficie atteint 112 hectares. 83 000 exposants sont présents (46 % sont français) et on comptera 50 millions de visiteurs ! On peut assister aux premières projections sur écran géant des films des frères Lumière. L'électricité trouve une nouvelle application : le trottoir roulant, baptisé « rue de l'Avenir ». Les arts décoratifs et l'art nouveau sont à l'honneur. En peinture, l'Impressionnisme triomphe. Le succès est une nouvelle fois au rendez-vous. Édouard Branly reçoit le grand prix

de l'exposition universelle de 1900 pour son radioconducteur exposé sur le stand de l'Institut catholique.

Le Palais de  
l'Électricité à  
l'exposition  
universelle de Paris  
(1900).



### *L'exposition de Saint-Louis, 1904*

L'exposition de Saint-Louis (Missouri) se déroule du 30 avril au 1<sup>er</sup> décembre 1904. Cette exposition conserve encore son titre de plus grande en superficie (avec 500 hectares, soit près de cinq fois plus que l'exposition de Paris de 1900). Comme ce fut le cas à Paris en 1900, les Jeux Olympiques de 1904 ont lieu à Saint-Louis pendant l'exposition (à partir du 29 août). L'année a été choisie pour célébrer le centenaire de la cession de la Louisiane (1804). 34 pays et 43 états ou territoires américains s'y retrouvent. Parmi les attractions, on peut voir la *Ferris Wheel*, première grande roue de l'Histoire. Au total, 19 millions de personnes visiteront l'exposition. Cette exposition revêt en physique, un aspect particulièrement important. En effet, dans le cadre de l'exposition se tient, en septembre 1904, l'un des premiers congrès scientifiques, le *Congrès International des Sciences et des Arts*. Les représentants français, désignés par Paul Appell, alors recteur de l'Académie de Paris, sont Paul Langevin (rapporteur de la session « Physique des électrons ») et son maître vénéré Henri Poincaré. Ce dernier y fait, le 24 septembre, un exposé remarquable et indique les grands principes qui, selon lui, gouvernent la physique. Donnons en quelques extraits :

*« Le principe de conservation de l'énergie, ou principe de Meyer, est certainement le plus important, mais ce n'est pas le seul. Il y en a d'autres dont nous pouvons tirer les mêmes avantages, ce sont :*

- *le principe de Carnot, ou principe de la dégradation de l'énergie [second principe de la thermodynamique] ;*
- *le principe de Newton, ou principe de l'égalité de l'action et de la réaction ;*
- *le principe de relativité, d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes soit pour un observateur fixe, soit pour un*

- observateur entraîné dans un mouvement uniforme, de sorte que nous n'avons et ne pouvons avoir aucun moyen de discerner si nous sommes oui ou non entraînés dans un pareil mouvement ;*
- *le principe de conservation de la masse, ou principe de Lavoisier.*
  - *J'ajouterai le principe de moindre action.*

[...] *J'en arrive au principe de Lavoisier sur la conservation de la masse, certes c'en est un auquel on ne saurait toucher sans ébranler la mécanique. Et maintenant, certaines personnes pensent qu'il ne nous paraît vrai que parce qu'on ne considère en mécanique, que des vitesses modérées... mais qu'il cesserait de l'être pour des corps animés de vitesses comparables à celle de la lumière... Il n'y a pas d'autre masse que l'inertie électrodynamique. Mais dans ce cas, la masse ne peut plus être constante, elle augmente avec la vitesse... »* Poincaré indique finalement dans sa conclusion cette remarquable prédiction : *« Peut-être, d'une manière analogue, pourrions-nous construire une mécanique entièrement nouvelle, que nous avons seulement réussi à apercevoir, dans laquelle l'inertie augmenterait avec la vitesse. La vitesse de la lumière deviendrait alors, une limite impossible à dépasser »*. Cette nouvelle mécanique verra le jour l'année suivante, en 1905, c'est la fameuse relativité restreinte.

### **Liste des expositions universelles des vingt dernières années (1985-2005)**

- 1985 : Tsukuba (Japon) : La maison et son environnement
- 1986 : Vancouver (Canada) : Expo 86
- 1988 : Brisbane (Australie) : World Expo 88
- 1992 : Seville (Espagne) : Expo 92
- 1998 : Lisbonne (Portugal) : Expo 98
- 2000 : Hanovre (Allemagne) : Expo 2000
- 2004 : Paris (France) : Exposition spécialisée sur le thème de l'Image
- 2005 : Aichi / Nagoya (Japon)

## Les débuts de l'industrie électrique

---

### *La seconde révolution industrielle*

La période allant de 1860 à 1910 est souvent appelée « seconde révolution industrielle » et correspond au développement des applications de l'électricité. La « fée électricité », est célébrée, comme nous l'avons vu

plus haut, par les expositions universelles, et devient vite le symbole de toute une époque. L'invention de la dynamo, au début des années 1870, et de la lampe à incandescence, dix ans plus tard, complète le succès déjà éprouvé du télégraphe électrique (depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle), de la lampe à arc (à peu près au même moment), ou du téléphone (depuis 1876). Ainsi, dès 1878, Lars Magnus Ericsson, en Suède, se lance dans la fabrication d'appareils téléphoniques. En 1880, Elihu Thomson et Edwin Houston fondent l'American Electric Company qui devient en 1883, la Thomson-Houston Electric Company. C'est l'époque où les premiers tramways électriques font leur apparition (milieu des années 1880<sup>13</sup>), et la compagnie Thomson-Houston, qui avait mis au point un excellent système de traction électrique, se trouve propulsée au rang des grands constructeurs de tramways.

Lors de cette période pionnière, on assiste à une prolifération désordonnée d'initiatives et d'entreprises nouvelles. La première exposition internationale d'électricité de 1881 ne compte pas moins de 1700 exposants. Il s'agit de petits ateliers (on parlerait aujourd'hui de *start-up*) qui se lancent dans la production de dynamos, de lampes à arc, de téléphones ou autres. Viendra ensuite le temps des consolidations et des concentrations : ainsi entre 1898 et 1902, 3000 entreprises aux États-Unis font l'objet d'une fusion ou d'une prise de contrôle. Les années

### Le développement de l'éclairage

Le premier éclairage électrique public par l'électricité (arc électrique) est fait par Léon Foucault à Paris, place de la Concorde, en décembre 1844 (le principe, qui consiste à appliquer une différence de potentiel entre deux pointes de charbon, avait été découvert par Humphrey Davy, en 1813). Cependant, le dispositif de Foucault était beaucoup plus élaboré et lui avait demandé la mise au point d'un régulateur. Le dispositif demandait toutefois, une maintenance importante et ce n'est que vers 1878 que l'éclairage public électrique par arc électrique connut un essor significatif (ce type d'éclairage était beaucoup plus sûr que celui qui utilisait des lampes à gaz, sources de nombreux incendies).

La lampe à incandescence d'Edison « démocratisa » l'utilisation domestique de l'éclairage électrique. Edison construit la première centrale électrique à New York, le 14 septembre 1882. Au démarrage de cette activité, le nombre de lampes à alimenter s'élevait à 2300. Deux ans plus tard (1884), ce nombre s'élève à 11 000. En 1885, les États-Unis utilisent plus de 250 000 lampes !

<sup>13</sup> Ils seront adoptés un peu partout dans les années 1890.

1880 voient la fondation d'entreprises qui deviendront des empires : AEG en Allemagne (1883) ; AT&T (American Telephone and Telegraph Company) aux États-Unis (1885) ; la General Electric Company (GEC) en Grande-Bretagne (1886) ; Westinghouse Electric Corporation aux États-Unis (1886) ; la Société normande d'électricité en France (1888, qui deviendra la CGE en 1898) ; Philips aux Pays-Bas (1891) ; Brown Boveri & Cie en Suisse (également en 1891) ; la General Electric Company (GECo puis GE à ne pas confondre avec la compagnie anglaise GEC), résultant de la fusion des sociétés Thomson-Houston et Edison General Electric (1892) ; la Compagnie Française Thomson-Houston : CFTH (1893). Un peu plus tard, on assistera à la création de la Nippon Electricity Company (NEC) au Japon (1899) de Telefunken en Allemagne (1903).

### *Un exemple marquant la « Einstein & Co. Electrotechnical Factory »*

Un jeune frère d'Hermann Einstein (le père d'Albert Einstein), Jacob, venait de finir ses études d'ingénieur et décida de créer à Munich, une entreprise de conduction d'eau<sup>14</sup> et d'équipements électriques. Comme ses propres fonds ne suffisaient pas, il réussit à convaincre son frère Hermann de se lancer également dans cette entreprise : moyennant un gros investissement, il en deviendrait le patron. Au moment où le monde entier commençait à introduire l'éclairage électrique, la modeste entreprise envisagée semblait promue à un bel avenir. Mais les objectifs de Jacob allaient au-delà de cela. Il voulait, entre autre chose, développer et fabriquer sur une grande échelle, une dynamo de sa propre invention. Cette ambition impliquait la construction d'une usine plus grande et une augmentation significative du capital. Toute la famille, et particulièrement le beau père d'Hermann, Julius Koch, a par sa participation financière rendu possible le projet. Ainsi naît la *J. Einstein & Co. Electrotechnical Factory*. On y fabrique différents types de dynamo, des panneaux de contrôle électrique, des lampes et des instruments de mesure. Au milieu des années 1880, l'entreprise Einstein employa jusqu'à 200 personnes et cette PME était compétitive vis-à-vis de grosses entreprises comme Siemens ou AEG. En octobre 1886, l'entreprise Einstein est chargée de réaliser l'installation de l'éclairage électrique de la fameuse *Oktoberfest* de Munich, ainsi que l'éclairage de différentes entreprises locales comme la brasserie Pschorr. À la fin des années 1880, le carnet de commande augmente,

<sup>14</sup> L'eau courante se généralise rapidement à partir de 1880, ce qui nécessite des infrastructures urbaines aussi bien que des canalisations internes aux habitations.

grâce en particulier, à la mise en place de l'éclairage électrique dans les petites villes voisines de Munich.

En 1893, un gros marché se présente. La ville de Munich annonce la mise en place de l'éclairage électrique dans certaines rues : 360 lampes à arc à fournir pour une puissance totale installée de 200 kW. Naturellement, l'entreprise Einstein répond à la consultation, mais c'est une autre société (Schuckert de Nuremberg) qui est retenue, compte tenu de son expérience dans la conduite de projet de cette importance. Le coup est dur et d'autant plus mal accepté par les frères Einstein que c'est une entreprise de Nuremberg, et non de Munich, qui est sélectionnée. C'est l'occasion pour eux de réactiver un plan qu'ils avaient échaudé un peu auparavant : l'implantation d'une filiale en Italie, pays avec lequel ils étaient déjà en affaires. La perte du marché munichoïse et la mauvaise situation économique allemande en 1893, les incitent à prendre une décision plus drastique. C'est l'ensemble de l'entreprise qu'ils vont délocaliser en Italie. Les frères Einstein se préparent à construire une assez grande usine à Pavie (au sud de Milan) utilisant la puissance électrique d'un générateur hydraulique mû par les eaux de la rivière Naviglio. Mais un imbroglio industrialo-financier les contraint d'abandonner et de liquider leur société durant l'été 1896. La belle-famille Koch avait beaucoup perdu d'argent. Jacob se fit embaucher comme ingénieur dans une autre entreprise. Mais Hermann ne pouvait pas, et ne voulait pas faire de même. Une des raisons était

### **Les Einstein, une famille resserrée**

Les parents d'Einstein sont Hermann Einstein et Pauline Einstein (née Koch). Rudolf Einstein, le cousin d'Hermann avait épousé Fanny Koch, la sœur de Pauline. Le couple Rudolf (Einstein) – Fanny (née Koch) ont eu trois filles, dont Elsa. Elsa Einstein a épousé Max Loewenthal en 1896 et lui a donné deux filles : Ilse et Margot. Elsa et Max ont divorcé en 1908, Elsa s'installa alors à Berlin avec ses deux filles. Albert Einstein est nommé en juillet 1913 à l'Académie des sciences de Berlin et y fait de fréquents séjours. Il y rencontre Elsa (qui est à la fois sa cousine germaine par sa mère et sa cousine issue de germain par son père), leur relation se transforme petit à petit en liaison. Albert et sa femme Mileva (née Maric) se séparent peu après (1914) et Mileva retourne à Zürich avec ses enfants. Début 1919, Albert et Mileva divorcent, Einstein lui promet l'argent du prix Nobel (qu'il n'a pas encore ! mais il tiendra promesse lorsqu'il le recevra en 1922) et se remarie, le 2 juin 1919 avec Elsa. Elsa Einstein redevient Elsa Einstein (par le nom de son mari, cette fois), et le couple vivra avec Ilse et Margot.

qu'il savait que sa femme Pauline accepterait très mal une baisse de « standing » et de statut social. Contre l'avis de son jeune fils (Albert Einstein qui avait alors 17 ans), Hermann décide de créer une nouvelle société. De nouveau, il reçoit l'aide de sa famille, cette fois, principalement de Rudolf Einstein, le père d'Elsa Einstein (la cousine d'Albert qui deviendra sa seconde femme).

La nouvelle petite entreprise connue des hauts et des bas mais n'apporta jamais la sécurité financière à la famille. Cette situation affecta la robuste santé d'Hermann et il mourut prématurément, en 1902, d'une attaque cardiaque, laissant des dettes à Rudolf lors de la liquidation de l'affaire. Albert Einstein connaîtra durant toute sa jeunesse des difficultés d'argent, et malheureusement, Hermann ne saura pas que son fils deviendrait l'un des meilleurs physiciens de tous les temps.

## Les fondements de l'électromagnétisme

**L'électrostatique** repose sur les constats suivants :

une charge  $q$  crée un champ électrique  $\vec{E}$  de telle sorte qu'une charge d'épreuve  $q'$  subit en présence de ce champ, une force  $\vec{f} = q'\vec{E}$ . L'expression de cette force est donnée par la loi de Coulomb :  $\vec{f} = \frac{qq'\vec{u}}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ , où  $\vec{u}$  désigne le vecteur unitaire joignant les points où se trouvent les charge  $q$  et  $q'$  et  $r$  la distance entre ces deux charges.

Considérons deux charges  $q_1$  et  $q_2$ . Elles créent des champs  $\vec{E}_1$  et  $\vec{E}_2$ . Placée en présence de  $q_1$  et  $q_2$ , une charge d'épreuve  $q'$  subira la force  $\vec{f} = q'(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)$ . Ce constat est appelé principe de superposition. La loi de Coulomb et le principe de superposition sont à la base de l'électrostatique.

**La magnétostatique** repose sur les constats suivants :

un courant  $i$  parcourant une portion infinitésimale de fil orienté par  $d\vec{l}$  créé en un point M distant de  $r$ , un champ magnétique  $\vec{B}$  donné par  $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{i d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2}$ , où  $\vec{u}$  désigne le vecteur unitaire joignant l'élément  $d\vec{l}$  au point M. La formule ci-dessus est appelée loi de Biot et Savart. Considérons deux courants  $i_1$  et  $i_2$ , ils créeront respectivement des champs  $\vec{B}_1$  et  $\vec{B}_2$ . La présence simultanée de ces courants créera un champ  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ . Ce constat est appelé principe de superposition. La loi de Biot et Savart et le principe de superposition sont à la base de la magnétostatique.



# 3

## La découverte

---

### La conduction de l'électricité

---

#### *Un concept qui se dégage lentement*

Nous avons indiqué au chapitre 2, dans quelles circonstances Gray avait, en 1729, fait la distinction entre les matériaux conducteurs et les matériaux isolants. Les expériences de Gray et Wheeler montrent que la transmission de l'électricité se fait correctement dans les corps conducteurs jusqu'à une distance de 240 m. Ayant obtenu ce résultat de leurs constats expérimentaux, ils ne cherchent pas spécialement à augmenter cette distance. Jusqu'à la découverte de la pile par Volta en 1799, les physiciens sont limités à l'électrostatique. Notons tout de même, à titre anecdotique, quelques-unes des « expériences frappantes » de l'Abbé Nollet (probablement faites en 1746). Ce dernier fait placer des gens en file, chacun tenant les mains de ses voisins pour former une chaîne. Nollet applique alors aux deux extrémités de la chaîne les pôles d'une bouteille de Leyde, ce qui provoque une décharge qui fait sursauter chaque « élément » de la chaîne. Cette expérience fait sensation et Nollet la répète à Versailles devant le Roi et la cour sur une compagnie de 240 gardes qui sautèrent fort convenablement, ce qui assura le succès du spectacle ! Notre physicien ne s'arrête pas en si bon chemin : il électrise une respectable compagnie de Chartreux, dont la chaîne n'occupe pas moins de 3 km. Naturellement, chacun des bons pères, communiquant électriquement avec ses voisins par un morceau



Une expérience frappante.

de fil de fer, fait un bond. Pour originales qu'elles soient, ces expériences montrent bien la propagation de l'électricité dans les conducteurs ! Nous ne reviendrons pas sur la découverte de la pile, du lien entre électricité et magnétisme (Oersted, 1819), ni sur la merveilleuse synthèse réalisée par Ampère sur les phénomènes électrodynamiques en 1820 et 1821. Rappelons simplement que la notion même de courant électrique est due au grand physicien français.

### Électricité statique et dynamique : une analogie

La quantité d'électricité, mesurée en coulomb, est équivalente à une quantité de liquide, mesurée en litre. Une pile, ou une batterie contiennent des charges, elles jouent donc le rôle de réservoir. De la même façon que l'on peut vider le liquide du réservoir à travers un tuyau, on peut faire passer les charges à travers un conducteur électrique. Le débit du liquide passant à travers le tuyau est l'équivalent de l'intensité du courant passant à travers le conducteur.

Après la découverte de l'induction par Faraday en 1831, il existe en physique trois types d'électricité. Le premier est issu des machines électrostatiques, le second des piles et enfin le troisième est celui associé aux phénomènes d'induction. En 1832, Faraday s'attache à montrer l'identité de l'électricité provenant de ces différentes sources. Pour cela, il examine méthodiquement leurs effets sur le galvanomètre et sur les décompositions chimiques produites. Cela l'amène, en 1833 et 1834, à faire une étude systématique de l'électrolyse et de ses lois. Il découvre les lois de l'électrolyse auxquelles son nom restera attaché. Faraday montre que la quantité de produits dégagés est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé le circuit et parle de « quantités chimiquement équivalentes ». Il frôle la notion d'électron et de mole d'électron : « *Si nous empruntons la terminologie de la théorie atomique, dit Faraday, des corps qui sont équivalents entre eux ont, associé à eux, des quantités égales d'électricité. Mais je dois avouer que je répugne à employer le mot atome, car s'il est aisé d'en parler, il est par contre très difficile de s'en faire une idée claire* ». L'étude des lois de l'électrolyse permet de mieux connaître la conductibilité des solutions ioniques (c'est-à-dire des fluides conducteurs). À la même époque, à la suite de la découverte de la loi d'Ohm (1826), les physiciens adoptent petit à petit le concept de résistance, tandis qu'en France, il faudra attendre la fin des années 1830 pour qu'il en soit ainsi.

## Un atome d'électricité

En 1874 (à cette époque Branly prépare sa thèse de physique à la Sorbonne), Ferdinand Braun s'intéresse à la conduction de l'électricité dans différents milieux. Il fait en particulier des mesures sur les cristaux de sulfures métalliques. Il remarque alors que, selon la façon dont on place le cristal, il conduit ou ne conduit pas l'électricité, mais surtout, que l'électricité n'est conduite que dans un seul sens. C'est la première observation de l'effet dit redresseur de ces cristaux. Le sulfure de plomb, ou galène, permettra à Braun d'imaginer le fameux « poste à galène » au début du XX<sup>e</sup> siècle (voir chapitre 4).

Toujours en 1874, le physicien écossais Stoney reprend les idées de Faraday et ose introduire la notion de quantité élémentaire d'électricité. Il indique que la quantité minimum d'électricité est l'une des trois unités fondamentales de la Nature, les deux autres étant la vitesse de la lumière (dont Maxwell a montré qu'elle s'écrit comme le rapport de l'unité électrostatique à l'unité électrodynamique de la charge) et la constante de gravitation de Newton. Stoney conclut : « [...] *La Nature nous présente dans le phénomène d'électrolyse, une quantité élémentaire d'électricité qui est indépendante du corps particulier sur laquelle elle agit. Pour clarifier ce point, je vais expliciter la « loi de Faraday » selon les termes suivants : Pour chaque liaison chimique qui est rompue dans un électrolyte, une certaine quantité d'électricité traverse cet électrolyte qui est la même dans tous les cas. Cette quantité d'électricité, je l'appellerai  $E_r$ . Si nous en faisons notre unité d'électricité, nous ferons probablement un pas très important dans nos études des phénomènes moléculaires* ».

En 1881, Helmholtz résume la situation : « *Maintenant, le résultat le plus saisissant de la loi de Faraday est peut-être ceci. Si nous acceptons l'hypothèse suivant laquelle les substances élémentaires sont composées d'atomes, nous ne pouvons éviter de conclure que l'électricité, aussi bien positive que négative, est également divisée en quantités élémentaires qui se comportent comme des atomes d'électricité. Tant qu'il se déplace dans un électrolyte liquide, chaque ion reste entier avec sa charge électrique équivalente. La décomposition peut avoir lieu à la surface des électrodes s'il existe une force électromotrice suffisante, et alors dans ce cas, l'ion donne sa charge électrique et devient électriquement neutre* ».

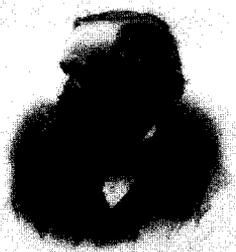
À ce moment, à Paris, Édouard Branly partage son temps entre son enseignement de physique à l'Institut Catholique et ses études de médecine. Ce n'est qu'à partir de 1886 qu'il va de nouveau se consacrer à ses recherches en physique. Avant de les présenter, il nous faut décrire deux grandes découvertes, toutes deux faites par Hertz : l'effet photoélectrique (1887) et les ondes électromagnétiques (1888).

# Découverte des ondes hertziennes et de l'effet photoélectrique

---

## *Un point de départ : les équations de Maxwell*

Dès 1861, dans un article consacré aux lignes de champ de Faraday, Maxwell prévoit l'existence des ondes électromagnétiques : « *Nous ne pouvons guère éviter d'inférer, dit Maxwell, que la lumière n'est autre que les ondulations transverses du même milieu qui est la cause des phénomènes électriques et mécaniques* ». Le savant écossais élabore une synthèse remarquable qui le conduit en 1868, à établir les équations du champ électromagnétique (appelées à juste titre « Équations de Maxwell »), véritable synthèse englobant électricité, magnétisme et optique. Le grand physicien autrichien Ludwig Boltzmann écrira à propos de ces équations, en paraphrasant le Faust de Goethe : « *Fut-ce un Dieu qui écrivit ces signes ?* ». Les équations de Maxwell sont aujourd'hui un outil extrêmement puissant pour l'étude des phénomènes électromagnétiques car elles permettent d'avoir une vision synthétique de ce vaste domaine. Elles permettent de résoudre toutes sortes de problèmes, qu'il s'agisse d'optimiser un tube cathodique, un transformateur ou de déterminer les lois de propagation de la lumière dans une fibre optique, on sait que l'on pourra toujours s'appuyer sur ces fameuses équations. À l'époque de Maxwell, les physiciens ne percevaient pas encore, pour la plupart, toute la puissance de ce travail. La mise en perspective de cette richesse presque infinie sera faite par quelques « maxwelliens » : FitzGerald, Heaviside, Larmor et Lodge en Angleterre ; Hertz en Allemagne ; Lorentz en Hollande ; Poincaré en France.



James Clerk Maxwell  
(1831-1879).

## *Hertz entre en scène*

Une conséquence spectaculaire des équations de Maxwell est qu'une onde lumineuse résulte du couplage entre le champ électrique et le champ magnétique. Une onde lumineuse est caractérisée par une fréquence  $f$ , ou ce qui revient au même, par une longueur d'onde  $\lambda$  (le produit des deux est égal à la vitesse de propagation de la lumière  $c$  ( $\lambda \times f = c$ ). Ainsi, dans le vide,  $c = 300\,000$  km/s). Pour les ondes lumineuses, la longueur d'onde  $\lambda$  peut varier de  $0,4\ \mu\text{m}$  (violet) à  $0,8\ \mu\text{m}$  (rouge), mais rien n'empêche dans la théorie de Maxwell d'avoir des ondes de différentes longueurs d'onde :  $1000\ \text{m}$  ou  $500\ \text{m}$  ou  $1\ \text{mm}$  ou n'importe quoi d'autre ! La détection de telles ondes permettrait de valider la théorie du physicien écossais. Ces ondes vont être perçues par Thomas Edison et Elihu Thomson, mais elles ne seront découvertes véritablement que par Hertz.

## La découverte manquée de Thomas Edison, Elihu Thomson et Hendrick Antoon Lorentz

En 1875, Thomas Edison (il a alors 28 ans) remarque que les relais électriques de son télégraphe font jaillir (sans contact) des étincelles à partir d'objets métalliques proches. Il conclut à : « *Une force éthérique jusqu'alors enfouie dans les profondeurs de l'ignorance* » et publie sa « découverte » dans le *Scientific American*. À la lecture de cet article, un jeune professeur de l'Académie technique de Philadelphie, Elihu Thomson (fondateur de la compagnie Thomson – Houston, devenue Thomson – CSF, puis maintenant THALES) se souvient, en lisant l'article, d'avoir observé le même phénomène quatre ans plus tôt ! Il refait ses expériences et réussit à faire jaillir des étincelles à plus de 30 m de la bobine de Ruhmkorff qu'il utilise comme générateur. Contrairement à Edison, il attribue une origine électrique à ce phénomène, ce qui le conduit à une controverse publique avec le brillant inventeur.

Toutefois, Elihu Thomson n'ira pas plus loin dans l'interprétation de ce phénomène, laissant la gloire de la découverte des ondes électromagnétiques à l'allemand Hertz. Aux États-Unis, l'œuvre de Maxwell n'est en effet pas connue, et en Europe, la diffusion des travaux du fondateur de l'électromagnétisme est due à une poignée de physiciens remarquables qui font connaître l'œuvre de Maxwell tout en la rendant plus accessible. Parmi ces « maxwelliens », il faut citer Lodge et Fitzgerald, qui sont convaincus de l'existence des ondes électromagnétiques (en 1882, Fitzgerald suggère leur production par la décharge d'un condensateur). Un autre de ces maxwelliens, le hollandais Hendrick Antoon Lorentz, alors en deuxième année d'études à Leyde, découvre en 1872, les publications de Maxwell. Il est passé très près de la découverte. Un de ses camarades raconte « *qu'à cette époque, Lorentz était rempli de nouvelles idées en physique et entrevoyait l'existence de nouveaux phénomènes, encore inconnus, qu'il tentait de découvrir. Il était convaincu de l'existence des ondes électromagnétiques et essayait d'en savoir plus en étudiant les décharges produites par des bouteilles de Leyde [...] Il n'est pas parvenu à découvrir les ondes électromagnétiques parce que les instruments qu'il utilisait étaient vraiment trop rustiques* ».

L'annonce de la production d'ondes électromagnétiques sera faite par Hertz en juin 1888, dans les *Comptes Rendus de l'Académie de Berlin*. Analysons rapidement le parcours qui le mène à ce grand résultat.

Heinrich Hertz naît le 22 février 1857, à Hambourg d'une famille aisée. Son enfance est heureuse et studieuse. Il se montre brillant. Il lit les tragédies grecques dans le texte, récite Dante, se passionne pour les



Heinrich Hertz  
(1857-1894).

mathématiques et se montre très habile manuellement. Après une formation d'ingénieur architecte à l'Université de Francfort et un passage à l'Institut polytechnique de Dresde, il s'oriente finalement vers l'étude des sciences de la nature à Munich. En octobre 1878, Hertz part pour Berlin afin de suivre une formation doctorale. Il a pour professeur deux grands physiciens, Kirchhoff et Helmholtz. En 1880, une fois obtenu son doctorat en physique, il devient l'assistant de Helmholtz qui lui donne ses premiers sujets de recherche. En 1883, il obtient un poste de Maître de conférence à l'Université de Kiel, mais ne disposant pas de laboratoire, il va se consacrer à des études théoriques : elles portent sur la théorie électrodynamique de son maître Helmholtz. Hertz est ensuite nommé, au tout début de 1885, professeur de physique expérimentale à Karlsruhe, où il succède à Ferdinand Braun qui laisse un laboratoire bien équipé. C'est dans cette université qu'il va accomplir les travaux qui allaient le rendre universellement célèbre.

### *Le diapason électrique*

Hertz, formé par Helmholtz, se consacre à une étude suggérée par son ancien professeur : déterminer l'action électrodynamique des courants dans les isolants. Il est difficile de dire si Hertz a été également inspiré, à cette époque, par la théorie de Maxwell, « concurrente » à celle de Helmholtz. Toujours est-il que Hertz s'est probablement posé la question de savoir s'il serait possible de produire des ondes électromagnétiques. S'il s'agissait d'ondes acoustiques, il suffirait d'utiliser un diapason. En frappant sur l'une de ses tiges, une vibration mécanique se produit qui met à son tour en mouvement l'air avoisinant et ce sont ces vibrations qui sont perceptibles par l'oreille. Hertz sait cela d'autant mieux que son ancien mentor, Helmholtz, est l'un des maîtres en acoustique physique et physiologique. La grande différence porte sur la fréquence. Le *la* du diapason correspond à 440 vibrations par seconde (440 Hertz !), tandis qu'un circuit électrique susceptible d'émettre une onde électromagnétique doit osciller à une centaine de millions de vibrations par seconde ! Hertz se dit alors, qu'il faudrait constituer une sorte de *diapason électrique*. Il décrit lui-même son dispositif de la façon suivante : « *La disposition envisagée constitue une sorte de diapason électrique. La théorie conduit d'une manière parfaitement sûre à cette conception et elle permet en outre, d'évaluer avec une certaine approximation, la durée d'oscillation de ce diapason à un cent millionième de seconde* ». Son dispositif est formé d'un fil de cuivre (d'environ 5 mm de diamètre et 1,5 m de longueur) terminé à chaque extrémité par une sphère métallique de 30 cm de diamètre, et coupé en son milieu par deux petites boules en laiton de 3 cm de diamètre, séparées entre elles d'un écart très faible et réglable (cette partie constitue l'*éclateur*). Cette tige est connectée à une bobine de

Ruhmkorff dont les décharges produisent des courants qui oscillent rapidement d'une extrémité à l'autre du circuit<sup>1</sup>. Après quelques va-et-vient, une étincelle éclate entre les deux boules. Ce diapason électrique constitue le circuit primaire de Hertz, encore appelé excitateur, où émetteur puisque c'est lui qui produit les ondes. Hertz commente son image de diapason : « Pour qu'un semblable diapason vibre, il faut que l'action excitatrice se produise ou cesse d'une manière suffisamment instantanée, c'est-à-dire dans un temps qui soit du même ordre que la durée d'oscillation. Il n'est pas possible de réaliser des changements aussi brusques par des procédés mécaniques, mais l'étincelle électrique, sous la forme spéciale que nous avons décrite, nous en donne le moyen ». Le principe est le suivant : lorsque les deux grosses sphères sont soumises à la décharge de la bobine de Ruhmkorff, l'une se charge d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, puis la bobine cesse d'agir. « Les deux électricités se combineront, dit Hertz, mais le courant ainsi développé se prolongera au-delà de cette combinaison même, et créera sur les deux sphères des charges inverses de celles qu'elles présentaient d'abord ; celles-ci provoqueront une nouvelle décharge, et ainsi de suite, il se produira de la sorte, une série d'oscillations entre les deux sphères. »

## Un détecteur simplifié : le résonateur de Hertz

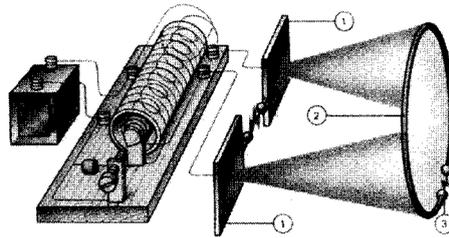
La détection de l'onde se fait par un *circuit secondaire*, formé d'un simple fil de cuivre en forme de cercle ou de carré, coupé lui aussi par deux petites boules métalliques formant un *éclateur*. Ce circuit secondaire est également appelé *résonateur* car il résonne avec le primaire. Le 13 novembre 1886, Hertz note dans son journal que des courants induits dans le circuit primaire apparaissent dans le circuit secondaire. Même si pour l'instant, les deux circuits ne sont séparés que d'un mètre cinquante, les étincelles du secondaire sont extrêmement faibles. La longueur des étincelles est inférieure au millimètre, elle peut même descendre au centième de millimètre. Ces minuscules étincelles ne peuvent être vues que dans l'obscurité, parfois même à l'aide d'une loupe, mais heureusement, leur grésillement caractéristique permet de déceler leur présence à l'oreille. Hertz indique lui-même que « les étincelles sont microscopiques, à peine longues d'un centième de millimètre, leur durée est inférieure à un millionième de seconde. Il paraît impossible, presque inconcevable, qu'elles soient visibles, et pourtant elles le sont, dans une chambre obscure et pour un œil reposé ». En expérimentateur minutieux, Hertz refait plusieurs fois l'expérience et, du 25 au 27 janvier 1887, pour mieux voir les étincelles il enferme l'éclateur du secondaire dans une boîte. À sa

<sup>1</sup> Le calcul de la période de ce diapason électrique est très simple. D'après la théorie de William Thomson (futur Lord Kelvin), elle est égale à  $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$  où C est la capacité des deux sphères placées à grande distance l'une de l'autre et L la self-induction du fil de cuivre reliant ces deux sphères.

surprise, il constate qu'en faisant cela, les étincelles s'affaiblissent de façon nette. Hertz rend compte de son constat : « Dans une série d'expériences sur les effets de résonance entre des oscillations électriques très rapides, deux étincelles électriques sont produites simultanément par une bobine d'induction. L'étincelle A est celle du primaire, l'étincelle B celle du secondaire. J'ai enfermé l'étincelle B dans un compartiment obscur de façon à faire les observations plus facilement, j'ai alors constaté que la longueur maximum de cette étincelle diminuait ». Il comprend que quelque chose de nouveau se produit et décide d'interrompre ses explorations antérieures pour se consacrer à l'étude du nouveau phénomène.

Principe de l'expérience de Hertz pour la production et la détection des ondes électromagnétiques.

① = circuit primaire (diapason électrique) ; ② = circuit secondaire (résonateur) ; ③ = étincelle au secondaire éclatant au passage de l'onde.



### La découverte de l'effet photoélectrique

Au printemps et à l'été 1887, Hertz montre que ce sont les rayons ultraviolets présents dans les étincelles du primaire qui sont l'origine du phénomène observé. Pour cela, il utilise un spectroscopie constitué d'une source lumineuse (une étincelle ou un arc) et d'un élément dispersif permettant de sélectionner la longueur d'onde du rayonnement incident. Le rayonnement de longueur d'onde choisie est envoyé sur le circuit secondaire après avoir traversé un milieu qui absorbe plus ou moins les rayons UV. Hertz interpose successivement entre la source de rayonnement et le secondaire : du quartz ; du gaz de houille ; une mince plaque de mica ; du verre. Il trouve que le quartz (qui est transparent aux rayons ultraviolets) n'affecte pas le phénomène tandis que le verre et le mica, et dans une moindre mesure le gaz de houille, sont « opaques au rayonnement à l'origine du phénomène observé » (c'est-à-dire aux UV). En juillet 1887, Hertz fait part de ses résultats à la communauté scientifique en publiant un article intitulé : « Sur un effet de la lumière ultraviolette sur les décharges électriques ». Il précise dans cet article qu'il se « borne à présent, à communiquer les résultats obtenus, sans essayer de bâtir une théorie expliquant l'origine des phénomènes observés ». Ce que Hertz vient de découvrir c'est « l'effet photoélectrique ». Nous allons voir que l'étude de cet effet sera

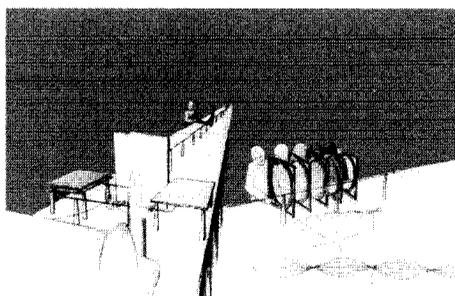
poursuivie par Wilhelm Hallwachs, puis par Philipp Lenard. C'est en approfondissant les expériences d'Hallwachs qu'Édouard Branly va, de son côté, découvrir encore un nouveau phénomène, celui de la radioconduction. Par ailleurs, l'analyse expérimentale quantitative de Philipp Lenard va conduire à une grave crise de la physique. L'effet photoélectrique ne trouvera pas d'interprétation dans le cadre de la théorie électromagnétique de Maxwell, il en constitue une première limite. Il faudra attendre 1905 et Albert Einstein avant d'entrevoir une solution... qui mettra vingt ans à s'imposer ! Ainsi, par un étrange concours de circonstance, Hertz allait découvrir un phénomène qui représente les limites de la théorie de Maxwell, avant de mettre en évidence les ondes électromagnétiques qui allaient en constituer la plus grande victoire !

### *La découverte des ondes électromagnétiques*

Avant de poursuivre ses recherches sur les ondes électromagnétiques, Hertz étudie l'influence suggérée par Helmholtz des étincelles du primaire sur des isolants, tels que du bois et du papier. Il ne constate rien de particulier, notons que s'il avait orienté ses recherches sur l'influence des étincelles du primaire sur des mauvais conducteurs (limailles métalliques par exemple), il aurait peut-être découvert l'effet de radioconduction ! Finalement, à l'automne 1887, il reprend le fil de ses travaux et semble pris d'une véritable frénésie de recherche comme l'atteste l'interruption de ses lettres qu'il écrivait pourtant régulièrement à ses parents. Il s'enferme dans son laboratoire et obtient, suivant les mots de sa femme « d'admirables résultats ». Hertz, à ce moment, relie le primaire à un long fil et découvre que des oscillations stationnaires se produisent dans le fil, lesquelles sont détectables par le secondaire. L'onde stationnaire résulte de la superposition de l'onde émise par le primaire et de l'onde réfléchi par l'extrémité du fil. Il apparaît des nœuds (amplitude nulle de l'onde) et des ventres (amplitude maximum de l'onde) repérables par l'absence ou la présence d'étincelles dans le secondaire. Hertz est heureux, il fait part de ses observations à Helmholtz : « *Je suis arrivé à produire des ondes stationnaires présentant de multiples nœuds dans des fils conducteurs rectilignes. En me limitant à 4 ou 5 nœuds, je peux les faire apparaître avec autant de netteté que ceux d'une corde vibrantes.* » Ces « ondes dans les fils » l'occupent jusqu'à fin décembre 1887. Le 23 décembre, il découvre comme un « beau cadeau, à la veille de la nuit de Noël » les premiers indices d'une propagation à vitesse finie. Le 27 décembre, il parle « d'ondes aériennes » qui deviendront les « ondes hertziennes ». Le 29 décembre, il constate que ces « ondes aériennes » sont réfléchies par des écrans métalliques. Au premier trimestre 1888, Hertz poursuit ses recherches avec l'aide de son fidèle

technicien Julius Amann. Cette année-là, les vacances de Pâques commencent le lundi 12 mars. L'Allemagne est en deuil, l'empereur Guillaume 1<sup>er</sup> vient de s'éteindre. Vacances et période de deuil font que l'université est vide. Au premier étage de la Technische Hochschule, l'amphithéâtre est désert. C'est une grande salle presque carrée de 15 m de long et de 14 m de large. Les ondes produites par Hertz ont 9 m de longueur d'onde, impossible de vérifier si elles peuvent former des ondes stationnaires dans une petite pièce, en revanche dans l'amphithéâtre... Ces vacances de Pâques tombent à point nommé. Hertz, et son technicien transforment la salle de cours en laboratoire : ils installent une sorte de passerelle dans l'allée centrale, elle est située à mi-hauteur pour éviter au maximum les réflexions parasites des ondes électriques sur le sol ou sur le plafond. Au fond de la salle, ils disposent une plaque de zinc (formant miroir) de quatre mètres sur deux, posée sur un échafaudage de bois. L'« émetteur » (ou plutôt l'oscillateur de Hertz, qu'il appelle le primaire) est disposé verticalement à 2,5 m au-dessus du sol, au bout de la passerelle, à 13 m du miroir et à 2 m du mur. L'éclat de l'étincelle de ce primaire est masqué par un écran de bois pour éviter qu'il ne perturbe le petit éclateur du secondaire (à cause de « l'effet photoélectrique »). Tandis qu'Amann actionne le primaire, Hertz, dans l'obscurité, se faufile le long de la passerelle, déplace son résonateur et cartographie l'état de l'onde stationnaire. À environ 4 mètres du miroir, il peut localiser un premier nœud, assez net. Il en observe un second, beaucoup plus flou à 9 mètres.

Production d'ondes stationnaires, on notera la présence de la plaque de bois entre l'émetteur et le récepteur pour se prémunir de l'effet photoélectrique.

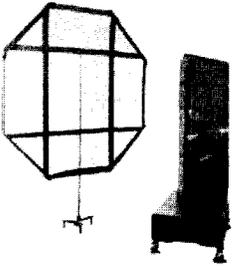


Le jeudi 15 mars 1888, Hertz, pour la première fois, dessine une onde électromagnétique stationnaire, on peut y voir les nœuds et les ventres du champ magnétique et du champ électrique. Il est le premier à produire, à détecter et à comprendre l'existence d'ondes électromagnétiques. Il peut fièrement rapporter ses observations à son maître Helmholtz : *« Les ondes électrodynamiques dans l'air se réfléchissent sur les parois conductrices et, à angle d'incidence nul, les ondes réfléchies interfèrent avec les ondes incidentes et génèrent des ondes stationnaires dans l'air. Sur les premières longueurs d'ondes comptées à partir de la paroi, les indices sont très*

clairs et nombreux, et je crois que la nature ondulatoire du son, dans l'espace libre, ne saute pas aussi clairement aux yeux que celle de cette propagation électrodynamique. » Hertz rédige un article où il relate ses expériences, qu'il transmet à l'éditeur le 1<sup>er</sup> avril 1888. « Ces expériences, écrit Hertz, montrent la propagation de l'induction sous forme d'ondes à travers l'air sous une forme visible et presque tangible ». De plus, il peut vérifier directement la vitesse de propagation qui coïncide avec celle de la lumière conformément à la théorie de Maxwell. La fréquence de l'onde émise est fixée par son diapason électrique, connaissant la self et la capacité du primaire il est facile, à partir de la formule de Thomson de déterminer la fréquence d'émission  $[1/2\pi\sqrt{LC}]$ . Par ailleurs, un résultat élémentaire de la théorie des ondes stationnaires indique que la longueur entre deux nœuds successifs est égale à la moitié de la longueur d'onde. Ainsi, une simple mesure donne la longueur d'onde (ici  $\lambda = 9$  m). Le produit de la fréquence par la longueur d'onde est égal à la vitesse de propagation qu'Hertz trouve égale à 320 000 km/s, valeur très proche de celle de la lumière.

Le 8 juin 1888, suite à l'article de Hertz, le grand physicien irlandais George Francis FitzGerald lui dit avoir lu l'annonce faite par « le professeur von Helmholtz de sa splendide vérification de la théorie de Maxwell, que des perturbations électromagnétiques sont propagées à la vitesse de la lumière », il ajoute qu'il « considère qu'aucune expérience plus importante n'a été faite dans ce siècle ». De son côté, Lodge rédige un article sur la question qu'il conclut ainsi : « L'ensemble de la question des rayonnements électriques paraît avancer de façon splendide ». Habile expérimentateur, Hertz est aussi très bon théoricien. Entre avril et octobre 1888, il rédige un article dans lequel il réécrit les équations du champ électromagnétique (qui figurent dans le traité de Maxwell de 1873) de manière plus symétrique et plus simple.

Les expériences de Hertz ne tardent pas à être refaites. À Dublin, FitzGerald et Trouton s'y emploient d'octobre 1888 à février 1889. À Liverpool, Lodge reproduit également l'expérience avec un « émetteur » plus puissant. Pendant ce temps, Hertz améliore le dispositif en réussissant à émettre des longueurs d'onde plus courtes. Il écrit, le 30 novembre 1888, à Helmholtz « qu'un hasard heureux m'a enseigné qu'il était non seulement possible de produire des ondes de plusieurs mètres de longueur, mais qu'on pouvait travailler avec des ondes encore plus courtes, qui permettent de gagner énormément en commodité. Avec des ondes de 33 centimètres de demi-longueur se propageant dans l'air, j'ai pu confirmer mes résultats antérieurs, et même améliorer certains d'entre eux ». Hertz utilise alors un oscillateur plus petit (d'une longueur d'une trentaine de centimètre) qu'il place sur la ligne focale d'un miroir cylindro-parabolique. Il obtient ainsi, un faisceau d'ondes électromagnétiques, qu'il appelle lui-même *rayons* par analogie avec les rayons lumineux.



Polariseur et prisme à bitume utilisés par Hertz dans ses expériences d'optique des ondes électromagnétiques.

Muni de cette « source » il peut refaire les expériences classiques d'optique. Il vérifie la propagation rectiligne de ses rayons et leur réflexion sur un miroir. Il parvient également à produire une onde polarisée grâce à un réseau de fils parallèles et construit même un prisme pour réfracter les ondes électromagnétiques. Il s'agit d'un énorme prisme en bitume, d'un mètre cinquante de haut, pesant 600 kg. Le 11 décembre 1888, Hertz transmet à l'Académie de Berlin un compte rendu de ses expériences, lequel est lu devant l'assemblée de cette noble institution le 13 décembre. « *Dorénavant, écrit Hertz, nous pourrions peut-être les nommer rayons de lumière de très grande longueur d'onde et profiter des avantages qui découlent de la reconnaissance de cette identité, tant pour le domaine de l'optique que pour celui de l'électricité.* » Ces « rayons de lumière de très grande longueur d'onde » seront baptisés tout simplement et très justement « ondes hertziennes ».

### *Les expériences de Hertz en France et en Europe*

Les premières reproductions publiques des expériences de Hertz sont effectuées en France au printemps 1889. On les doit à deux physiciens, Joubert et Nerville. Jules Joubert est l'un des membres fondateurs de la Société Française de Physique (SFP) et auteur avec Eleuthère Mascart (professeur au Collège de France et fondateur de l'École Supérieure d'Électricité) d'un traité intitulé *Leçons d'électricité et de magnétisme*. Guillebot de Nerville est ingénieur de l'administration des télégraphes, ancien élève de l'École supérieure de télégraphie (devenue depuis l'École Nationale Supérieure des télécommunications<sup>2</sup>), et responsable du Laboratoire Central d'Électricité (LCE). C'est dans les locaux du LCE que Joubert et Nerville préparent la démonstration dans une salle de 15 m de long par 14 m de large, qui n'est pas sans rappeler celle utilisée par Hertz à Karlsruhe. Les vendredis 24 mai et 31 mai 1889, les deux physiciens français invitent les membres de la Société Française de Physique et ceux de la Société Internationale des Électriciens à venir assister à la réplique des expériences de Hertz. L'expérience des ondes stationnaire est reproduite (en utilisant un miroir de 6 mètres sur 4 !). Une évolution du secondaire de Hertz (à la place de deux petites sphères métalliques, ils en utilisent une seule placée en regard d'une pointe) permet d'obtenir des étincelles plus brillantes. Une fois le détecteur bien réglé, « *on obtient, lit-on dans le compte rendu des expériences, des étincelles très brillantes atteignant 7 à 8 mm dans le voisinage de l'excitateur, mais qui sont encore visibles dans toutes les autres salles, dans la cour, dans la rue, même à plus de 50 m de distance et à travers plusieurs murs* ».

<sup>2</sup> Le mot « télécommunication » a été introduit en 1903, par l'ingénieur télégraphique Estaunié.

La notoriété de Hertz ne cesse de grandir et plusieurs groupes de physiciens, un peu partout en Europe, refont les expériences de Karlsruhe. C'est ainsi qu'à Genève, Édouard Sarasin et Lucien de la Rive refont, à partir du second semestre de 1889, l'expérience de propagation de l'onde le long d'un fil. Mais une surprise les attend : la longueur d'onde (ou, ce qui revient au même, la fréquence d'émission) ne semble pas dépendre du primaire (contrairement à ce que laisse prévoir la formule de Thomson ( $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ ) mais uniquement du secondaire. « *La longueur d'onde susceptible d'être constatée dans le mouvement ondulatoire émanant d'un seul et même primaire, écrivent-ils, varie d'une manière continue avec les dimensions du résonateur employé.* » Le résultat étrange observé est que la longueur d'onde mesurée est fixée par la dimension du secondaire et non par les caractéristiques physiques du primaire. Les expériences faites par Sarasin et de la Rive sont aussi minutieuses que nombreuses. Au passage, ils améliorent les conditions expérimentales de Hertz en faisant éclater l'étincelle dans l'huile, évitant ainsi l'oxydation des électrodes et rendant le seuil de déclenchement de l'éclateur plus stable. C'est une série de 27 mesures qu'ils relatent dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris en janvier 1890. Ils y indiquent que « *la valeur de l'inter-nœud [donc la longueur d'onde] ne dépend que du détecteur et est indépendante du générateur* ». Cette note est présentée à l'Académie par Alfred Cornu, lors de la séance du 13 janvier 1890. Il commente ainsi le rapport des physiciens genevois : « *Ces résultats montrent avec quelle réserve il convient d'accueillir les conséquences théoriques que M. Hertz a tirées de ses expériences, particulièrement en ce qui concerne la mesure de la vitesse de propagation de l'induction dans un conducteur rectiligne* ». Alfred Cornu va jusqu'à conclure sa présentation en disant : « *On voit qu'il est très prudent de procéder comme l'ont fait MM. Sarasin et de la Rive, c'est-à-dire d'étudier d'abord et avec précision la méthode expérimentale, très curieuse, imaginée par M. Hertz, avant de songer à la présenter comme une démonstration de l'identité de l'électricité et de la lumière* ».

Peu de temps après, Henri Poincaré, mathématicien de génie mais également physicien d'une grande finesse<sup>3</sup>, entre en scène. Il détecte une erreur commise par Hertz dans ses calculs. De façon forte élégante, il le prévient dans une lettre datée du 15 août 1890 :

« *Monsieur et Cher Collègue,*

*J'envoie à l'Académie des sciences de Paris une note qui contient une rectification à l'un des calculs qui accompagnent vos admirables expériences. Comme cette rectification porte sur un point important et est de nature à*

<sup>3</sup> Voir par exemple : *Poincaré physicien*, J.J. Samuëli & J.C. Boudenot, Éd. Ellipses, 2005.

remettre bien des choses en question, je crois devoir vous la communiquer, parce que vous êtes mieux à même que personne de résoudre les problèmes qu'elle soulève. Croyez d'ailleurs, Monsieur, que je n'en demeure pas moins un admirateur de votre génie, et que si le but que l'on croyait si proche semble s'éloigner, je ne crois pas que la valeur de vos recherches s'en trouve diminuée en quoi que ce soit. Ces protestations devraient être inutiles et elles le seraient en effet, si les savants de nos deux nations avaient toujours montré les uns pour les autres, une parfaite bienveillance. Pardonnez-moi ce long préambule, je viens au fait. Dans le Tome 31 de Wiedemann, pour calculer la période d'un excitateur, vous appliquez une formule d'après laquelle cette période (entière) est égale à  $2\pi\sqrt{LC}$ , C étant la capacité d'un condensateur et L la self-induction du fil qui en relie les deux plateaux. Dans cette formule, on désigne par C le rapport de la charge de l'une des armatures par la différence de potentiel des deux armatures. Il est aisé de s'en assurer en refaisant le calcul [Poincaré montre que la capacité à considérer doit être divisée par 2] ... Il résulte de là, que la longueur d'onde calculée doit être multipliée par  $1/\sqrt{2}$  et que la comparaison du calcul avec l'observation fournirait pour la vitesse de propagation :

$$300\,000 \text{ km/s} \times \sqrt{2}$$

Permettez-moi en terminant, de me féliciter d'avoir trouvé ainsi une occasion d'entrer en rapport avec un homme de votre valeur. Veuillez agréer, Monsieur et cher Collègue, l'assurance de ma considération la plus distinguée.

Poincaré »

Henri Poincaré intervient de nouveau dans un courrier qu'il écrit à Hertz, en date du 8 octobre 1890 :

« Monsieur et cher Collège,

[...] Voulez-vous me permettre maintenant quelques questions encore ? Lorsque vous opérez avec le petit excitateur et un miroir formé d'une plaque de zinc parabolique, vous interposez entre l'excitateur et le miroir un morceau de bois de peur que la lumière de l'étincelle réfléchi sur le miroir n'empêche les oscillations de se produire. Or, M. Blondlot ayant opéré avec le grand excitateur et un miroir a constaté que l'étincelle reste oscillante même lorsque sa lumière, après s'être réfléchi sur le miroir, vient frapper l'interrupteur où cette même étincelle se produit. Alors, voici ce que je voudrais vous demander : avez-vous placé votre morceau de bois préventivement sans avoir constaté ce qui se passerait si on le supprimait ou bien y a-t-il une différence à cet égard, entre le petit et le grand excitateur ?

Maintenant, une autre question ? Vous m'avez dit dans la première lettre que vous avez bien voulu m'écrire, que les expériences par lesquelles vous avez



Henri Poincaré  
(1854-1912).

trouvé la longueur d'onde de 4 m 80 vous semblaient douteuses parce que la réflexion sur les murs déplace les points d'interférence. Cette objection est applicable aux expériences de la première méthode par interférence des ondes transmises par le fil avec les ondes transmises par l'air ; mais elle ne l'est pas à celle de la 2<sup>nd</sup>e méthode par interférence des ondes transmises par l'air avec les ondes réfléchies par le mur. Or voici que MM. Sarrazin et de la Rive viennent de faire des expériences par cette seconde méthode. Leur résonateur de 75 centimètres avait des dimensions assez peu différentes du vôtre si je me rappelle bien ; l'excitateur était aussi à peu près le même ; ils semblent avoir opéré absolument dans les mêmes conditions que vous, avoir orienté le résonateur par rapport au mur de la même manière et ils ont trouvé des internœuds de 3 mètres. À quoi peut-on attribuer cette différence, est-ce à la forme de la salle, à la réflexion sur des parois latérales plus ou moins rapprochées l'une de l'autre, aux colonnes en fonte que vous aviez dans votre salle ; il me semble qu'il serait bien intéressant d'étudier l'influence de ces diverses circonstances en opérant avec des paravents mobiles. Si en effet le chiffre de M. Sarrazin venait à se confirmer, si on trouvait que c'est là la longueur d'onde qu'on obtient quand toutes les circonstances perturbatrices sont éliminées, la plupart des difficultés disparaîtraient. Je vous demande pardon d'abuser ainsi de votre obligeance à laquelle j'aurai sans doute encore recours bien des fois. Permettez-moi de vous soumettre une explication dont j'ai déjà entretenu M. Sarrazin et M. Blondlot pour rendre compte des expériences de MM S[arasin] et de la R[ive]. L'explication la plus naturelle c'est que le primaire émet un spectre continu, mais il me semble qu'il y en a une autre. Supposons que le primaire émette des vibrations qui décroissent très rapidement ; elles auront une courte durée et seront peu capables d'interférer. Supposons que la décroissance des oscillations du secondaire soit plus lente ; pendant une première période très courte, le secondaire serait mis en train par le primaire puis, le primaire s'étant éteint, il continuerait à vibrer pendant un temps relativement long avec sa période propre ; ce seraient alors ces vibrations du résonateur seul (de longue durée et interférant bien) que l'on observerait ; on s'expliquerait alors comment la longueur d'onde dépend uniquement du résonateur. Je ne vous propose cette explication que timidement. Pour ce qui est de la « période propre de l'étincelle » de M. Brillouin, je ne comprends pas mieux que vous ce qu'il entend par là [...] croyez aux sentiments bien dévoués de votre collègue.

Poincaré »

Finalement, le générateur de Hertz ne produit pas des ondes « monochromatiques » (d'une seule longueur d'onde ou d'une seule fréquence), mais un « train d'onde » contenant plusieurs fréquences et c'est finalement la dimension du résonateur qui sélectionne la longueur d'onde détectée. Cela n'enlève évidemment rien à l'immense mérite de Hertz. Cela souligne simplement la nécessité de faire varier les

protocoles expérimentaux, comme l'ont fait – entre autres – Sarasin et de la Rive, et la nécessité de procéder également à un examen approfondi des bases théoriques, comme l'a fait Henri Poincaré<sup>4</sup>. Nous sommes maintenant en octobre 1890, à un mois d'une autre grande découverte, celle de la radioconduction d'Édouard Branly.

Notons que, interrogé sur les applications pratiques de ces ondes, Hertz répondit qu'il n'en voyait aucune. Il ne connaîtra malheureusement pas le développement considérable de sa découverte, il meurt en 1894 à 36 ans, ce qui fera dire à Helmholtz : « À l'époque classique, on aurait dit qu'il a été sacrifié à l'envie des Dieux ».

## La découverte de la radioconduction

---

### *Branly étudie l'influence de la lumière sur la conduction électrique*

En 1888-1889, Branly fait des études sur la conductivité de toutes sortes de substances, en particulier des verres platinés et argentés. Son intérêt pour les phénomènes de conduction de l'électricité le conduit à s'intéresser aux travaux de Hallwachs sur l'action des rayonnements ultraviolets sur ce phénomène. Il présente ces travaux le 8 avril 1890, dans une note à l'Académie, relative à « La déperdition des deux électricités par des radiations très réfrangibles [les rayons ultraviolets] ». « Dans l'étude de l'action des radiations très réfrangibles sur les conducteurs électrisés, écrit Branly, l'arc voltaïque a été le plus souvent utilisé comme source de lumière, et c'est à son usage que se rapporte les phénomènes que MM. Hallwachs, Righi, Soletov, ont fait connaître. L'emploi d'une source lumineuse plus riche en rayons très réfrangibles m'a conduit à des résultats nouveaux... » D'une part, sa source est plus riche en ultraviolet. D'autre part, il étudie toutes sortes de configurations. Dans l'une d'elles, il analyse la déperdition d'un disque métallique. Puis il met deux de ces disques l'un en face de l'autre, à une distance d'environ 1 mm, chacun des disques étant reliés à l'un des pôles d'une pile (il réalise de la sorte, un

---

<sup>4</sup> Poincaré suit de près l'évolution de la TSF. Il écrira, au sujet de son histoire, « M. Branly a imaginé un récepteur beaucoup plus sensible [que celui de Hertz] qu'il appela radioconducteur et qui est fondé sur un principe entièrement différent (du résonateur de Hertz). L'importance de ses applications m'oblige à y consacrer un chapitre spécial. [...] La télégraphie sans fil n'aurait jamais pu fonctionner si l'on n'avait inventé un appareil beaucoup plus sensible que notre rétine. [...] Cet appareil, d'une exquise sensibilité sans laquelle la TSF serait toujours restée une chimère, est le cohéreur ou radioconducteur. »

condensateur). Lorsque l'éclat de l'étincelle illumine l'un des disques, il constate que « l'intervalle des deux plateaux est traversé par un courant ». Branly cesse alors de s'intéresser à la décharge du disque au profit du courant qui passe entre les deux plateaux, sous l'influence de l'étincelle. Il utilise à présent, un circuit qui va le mener à sa découverte. Ce circuit est, rappelons-le, constitué d'une pile, du conducteur à étudier (ici les deux disques) et d'un galvanomètre qui permet de lire le courant qui passe dans le dispositif. Puisque le courant passe entre les deux disques suite à l'éclairement de l'un deux, c'est que l'air, normalement isolant, devient soudainement conducteur. Branly va alors rechercher de façon systématique quels sont les matériaux qui acquièrent la propriété de voir chuter brutalement leur résistance quand ils sont soumis au rayonnement produit par une étincelle. Il utilise en particulier une « plaque d'ébonite cuivrée » et « un tube à limaille métallique ». Branly multiplie les expériences, consigne minutieusement les résultats observés dans ses cahiers de laboratoire et note, en particulier, la chute de résistance concomitante à l'apparition de l'étincelle. Il fait ses expériences dans son laboratoire, ou plutôt dans le dortoir désaffecté qui en fait office, puis il éloigne la source de lumière de son dispositif et constate que l'effet se produit encore. Le 20 novembre, Branly constate que l'interposition d'un carton entre l'étincelle et son dispositif, n'empêche pas le phénomène (chute de résistance) de se produire. Ce constat ouvre la porte de la découverte. Pourquoi Branly a-t-il placé un



Électroscope utilisé par Branly lors de ses études sur la conduction électrique.

### **Lien entre conductivité électrique et thermique**

Paul Drude est l'auteur, en 1900, d'une belle théorie sur les conductivités électrique et calorifique. Selon ses idées, un courant électrique dans un métal consiste dans le transport d'électrons libres qui se meuvent dans les interstices intermoléculaires (l'électricité positive, qui est attachée aux atomes, reste au repos). Les électrons libres peuvent être comparés à un gaz et l'idée de Drude consiste à appliquer aux électrons contenus dans un métal, les considérations statistiques dont on se sert en théorie cinétique des gaz. Il peut, grâce à cette interprétation, établir un lien théorique entre la conductivité électrique et la conductivité calorifique. La formule obtenue est remarquablement simple et montre que le rapport des conductivités est proportionnel à la température, la valeur de la constante de proportionnalité étant indépendante du métal. Expérimentalement, ce résultat est connu sous le nom de loi de Wiedemann-Franz (cette loi énonçant que le rapport de la conductivité thermique à la conductivité électrique pour les métaux est constant, avait été énoncée en 1853). Lorentz, en 1905, améliorera la théorie de Drude.

« bout de carton » entre l'étincelle et le dispositif récepteur ? Sans doute parce que Branly a l'habitude de faire varier de façon systématique les conditions de ses expériences. Ici, il s'agissait de montrer que l'origine supposée du phénomène est due au rayonnement ultraviolet et à lui seul. D'où l'interposition de différents écrans (lames de quartz, plaques de verre, etc.) entre « l'émetteur » et le « récepteur », comme d'ailleurs, Hertz l'avait également fait. Alors pourquoi du carton qui ne laisse passer ni les UV, ni le visible, ni l'infrarouge ? Peut-être parce que pour Branly, l'action avait pour origine l'étincelle et qu'il n'y avait pas de raison d'écarter *a priori*, une source d'émission, autre qu'ultraviolette, produite par cette étincelle.

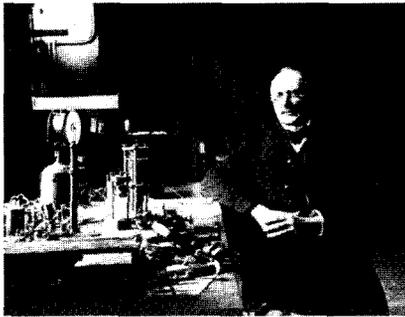
### *La découverte !*

De tous les dispositifs étudiés, c'est le « tube à limaille » qui se montre le plus sensible. Celui-ci est constitué d'un simple tube en verre de la taille d'un crayon. Il est rempli d'une limaille métallique (zinc, fer, aluminium, cuivre ou autre) et deux tiges métalliques ferment ses extrémités, tassent modérément la limaille et assure le contact électrique avec cette dernière.

Toujours en ce 20 novembre 1890, Branly fait le constat essentiel que la déviation de l'aiguille du galvanomètre est supprimée par tapotement sur la table. Le dispositif permet donc de transporter de l'information sans utiliser de fil. « *M. Branly, indique son préparateur Gendron, fait transporter la machine de Wimshurst dans l'amphithéâtre de physique. La machine se trouve à plus de vingt mètres du tube de limaille et du galvanomètre et en est séparée par quatre murs épais et par la cour...* » Édouard Branly est près du galvanomètre. Par la fenêtre, il fait signe à Gendron d'actionner l'éclateur, puis il revient à sa table, fixe un regard anxieux sur l'aiguille... elle bouge. Un petit choc sur le tube et l'aiguille reprend sa position initiale, le courant ne circule plus dans le galvanomètre. La TSF est née.

Dans sa communication à l'Académie des sciences du 24 novembre 1890, Branly résume les points essentiels : « *J'ai employé comme conducteurs, de fines limailles métalliques de fer, aluminium, antimoine, cadmium, zinc, bismuth, etc. La limaille est versée dans un tube de verre ou d'ébonite, où elle est comprise entre deux tiges métalliques. Si l'on ferme un circuit comprenant un élément Daniell, un galvanomètre à long fil et un tube à limaille, il ne passe le plus souvent qu'un courant insignifiant. Cependant, il y a une brusque diminution de résistance accusée par une forte déviation du galvanomètre quand on vient à produire, dans le voisinage du circuit, une ou plusieurs décharges électriques. Je fais usage, à cet effet, soit d'une petite machine de Wimshurst, avec ou sans condensateur, soit d'une bobine de*

Ruhmkorff. L'action s'observe très aisément et sans aucune précaution spéciale, à quelques mètres de distance. En faisant usage du pont de Wheatstone, j'ai pu constater cette action à plus de vingt mètres (en ligne directe) alors que l'appareil à étincelles fonctionnait dans une salle séparée du circuit dans lequel avait été inséré le tube à limaille, par trois grandes pièces et que le bruit des étincelles ne pouvait être perçu. Les variations de résistance demeurèrent considérables, par exemple, de plusieurs millions d'ohms au repos elles n'accusaient plus que deux mille et bien souvent, cent ohms après l'éclatement de l'étincelle. L'observation de la déviation d'un galvanomètre présentait cet avantage qu'elle permettait d'obtenir, par substitution, la mesure de la variation de résistance du tube à limailles, ainsi je réalisais, à distance, la production brusque d'un effet quelconque du courant. Dans ces diverses expériences, le tube à limailles ferme un courant à distance, sans aucun fil intermédiaire. »



Édouard Branly dans son laboratoire.

### *Après la découverte*

Quelque temps après sa découverte, Branly a l'idée de relier par un fil métallique un des pôles de son éclateur à l'un des fils métalliques verticaux qui guide la descente du store d'une fenêtre de son laboratoire. Le 12 janvier 1891, Branly fait une nouvelle communication à l'Académie où il note l'amélioration de l'efficacité du dispositif lorsque celui-ci est relié à une ou deux tiges métalliques qui font office d'antenne (le terme apparaîtra plus tard). La transmission atteint en effet maintenant 80 mètres, ce qui lui permet de communiquer entre son laboratoire, où se trouve l'émetteur, et le jardin des Carmes où il a placé son récepteur. Par ailleurs, dans le même compte rendu, Branly indique que la « diminution considérable de résistance est encore réalisée avec un crayon solide, formé en mélangeant en proportions convenables de la fleur de soufre et de la limaille d'aluminium ». Le 17 avril 1891, c'est au Bulletin de la Société Française de Physique, qu'il indique que « les limailles d'aluminium ou d'antimoine qui ont servi à un grand nombre d'essais avaient

*des grains compris entre 0,7 et 0,8 mm. On peut utiliser des particules beaucoup plus fines, ou beaucoup plus grosses, telles que des grains de plomb de 1 mm de diamètre... »*

En 1894, Oliver Lodge propose un mécanisme pour expliquer le phénomène de « radioconduction » découvert par Branly. « *Le champ électrique de l'onde, écrit Lodge, produit des forces attractives entre les grains de limaille, qui, après de microscopiques déplacements, les font entrer en cohésion les uns les autres en formant, entre les électrodes du tube, des chaînes conductrices du courant électrique. Ensuite, un choc (comme l'a signalé Branly) suffit pour briser ces chaînes fragiles et restituer au tube sa résistance électrique initiale élevée* ». Cette interprétation de Lodge est à l'origine du terme « cohéreur » qui sera utilisé pour désigner le tube à limaille de Branly. Cependant, ce dernier n'admet pas cette explication car ses expériences de 1891 lui ont montré que l'effet se produit de la même façon pour des billes plus grosses, dont il est peu probable qu'elles puissent subir « de microscopiques déplacements » sous l'effet d'une onde électromagnétique. Dans un article publié au CRAS le 12 février 1894, Branly pose la question : « *De quelle façon les particules conductrices cheminent-elles à travers l'isolant pour s'aligner ?* »

## Vers la notion d'électron

---

Lorsque Édouard Branly découvre la radioconduction, en novembre 1890, on ne connaît pas encore l'existence de l'électron. Sa découverte est intimement liée à l'histoire des « rayons cathodiques », qui va jouer, dans la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, un rôle très important en physique.

### *Les rayons cathodiques et leurs conséquences*

Les prémices remontent à Faraday. En 1835, le physicien anglais étudie les décharges électriques dans l'air raréfié et observe « l'espace obscur de Faraday ». Plus de vingt ans plus tard, en 1858, l'allemand Plücker montre, en étudiant la conductibilité et le spectre d'émission des gaz, que ces décharges sont déviées par le champ magnétique créé par un aimant. En approchant l'aimant près du tube, il observe une déviation de la tache phosphorescente produite par la décharge sur le verre. Son élève Hittorf réussit, en 1869, à montrer que le rayonnement se dirige en ligne droite. En effet, en interposant sur son trajet une croix métallique, il peut observer l'ombre de la croix se dessiner en sombre sur la paroi illuminée. Son compatriote Goldstein donne, en 1876, à ce rayonnement le nom resté célèbre de « rayons cathodiques ». En 1879, le physicien anglais Crookes améliore le vide par l'utilisation de pompes à mercure et fait une étude systématique des « rayons cathodiques » dans les « tubes de

Crookes ». Hertz prend le relais en 1883 (avant ses travaux sur les ondes électromagnétiques et l'effet photoélectrique) et essaie de dévier les rayons cathodiques par un champ électrique produit par des plaques métalliques insérées dans le tube, mais le résultat est négatif. En 1892, il place une feuille de métal très mince dans le tube et constate que les rayons cathodiques la traverse sans la percer.

### L'introduction du mot électron

C'est en 1891 que Stoney introduit le terme électron. La même année Richarz donne une estimation de sa charge :  $12,9 \times 10^{-11}$  ues cgs, soit  $4,3 \times 10^{-20}$  C. En 1894, Stoney en donne une valeur plus précise, il écrit : « *Dans cet article, nous avons fait une estimation de la valeur de cette remarquable unité fondamentale de l'électricité, pour laquelle j'avais suggéré le nom d'électron. Selon cette estimation, la valeur de l'électron est de  $10^{-20}$  C.* »

Lenard (que nous avons rencontré au sujet de ses mesures précises sur l'effet photoélectrique), qui est l'élève de Hertz et qui deviendra son assistant, réussit même, en 1894, à faire passer les rayons cathodiques à l'extérieur du tube à travers une feuille métallique de 2,5 microns (soit  $2,5 \times 10^{-6}$  m) d'épaisseur. La non déviation des rayons cathodiques par un champ électrique, et leur caractère pénétrant leur fait conclure à une origine ondulatoire. Le Français Jean Perrin résume ainsi la situation : « *Les uns, avec Goldstein, Hertz ou Lenard, pensent que ce phénomène est dû, comme la lumière, à des vibrations de l'éther ou même, que c'est une lumière à courte longueur d'onde. On conçoit bien alors que ces rayons aient une trajectoire rectiligne, excitent la phosphorescence et impressionnent les plaques photographiques. D'autres, avec Crookes ou J.J. Thomson, pensent que ces rayons sont formés par de la matière chargée négativement avec une grande vitesse. Et l'on conçoit alors très bien leurs propriétés mécaniques, ainsi que la façon dont ils s'incurvent dans un champ magnétique. Cette dernière hypothèse m'a suggéré quelques expériences...* ». En effet, Jean Perrin réalise une expérience où un faisceau de rayons cathodiques est recueilli par un cylindre de Faraday, ce qui lui permet de mettre en évidence la charge apportée par le faisceau. Le résultat de cette expérience est publié en décembre 1895 dans les comptes rendus de l'Académie des sciences, il y indique que « les rayons cathodiques sont chargés négativement. » En 1895, dans une première série d'essais, J.J. Thomson refait l'expérience de Perrin<sup>5</sup>. Peu après, en réfléchissant à l'expérience

<sup>5</sup> Dès 1893, J. J. Thomson déclare « *qu'il n'y a aucune autre branche de la physique [que celle de l'étude des rayons cathodiques] qui offre plus de promesses et d'opportunités pour pénétrer les secrets de la Nature* ». En 1894, J. J. Thomson annonce qu'il a trouvé que la vitesse des rayons cathodiques ( $1,9 \times 10^7$  m/s) est de loin, inférieure à celle de la lumière ( $3 \times 10^8$  m/s).

de Hertz, il suspecte le fait que le gaz résiduel dans le tube s'ionise sous l'action des rayons cathodiques, créant ainsi un écran électrostatique empêchant les rayons cathodiques d'être déviés par le champ.



Joseph John Thomson  
(1856-1940).

Dans une seconde série d'essais, pour lesquels il réalise un puissant pompage du tube, il obtient un bien meilleur vide que Hertz et en refaisant son expérience, il constate la déviation des rayons ! Il indique alors qu'« *il ne voit pas de moyen d'éviter de conclure que les rayons cathodiques sont chargés d'électricité négative portée par des particules de matière* » et poursuit en se demandant « *quelles sont ces particules ? Des atomes, des molécules ou de la matière très finement divisée ?* » Dans une troisième série d'expériences, il mesure avec précision la déviation des rayons cathodiques sous l'action d'un champ magnétique, ce qui lui permet d'en déduire le rapport de la charge  $e$  sur la masse  $m$  des rayons cathodiques (rapport  $e/m$ ). Il parvient finalement, en 1897, à une triple conclusion. Les rayons cathodiques sont des corpuscules chargés négativement, le rapport de leur charge  $e$  à leur masse  $m$  ( $e/m$ ) est 1000 fois plus grand que le rapport analogue calculé pour l'ion hydrogène à partir des lois de l'électrolyse, et enfin, ce rapport  $e/m$  ne dépend ni de la cathode, ni de l'anticathode, ni du gaz. Thomson conclut finalement que « *Les rayons cathodiques sont de la matière dans un nouvel état, un état dans lequel la subdivision de la matière est beaucoup plus grande que dans un gaz ordinaire : un état dans lequel toute matière ... est une et de même nature ; cette matière étant la substance à partir de laquelle tous les éléments chimiques sont formés.* » Il ajoute toutefois : « *La petitesse de la valeur  $m/e$  [il utilise dans son article le rapport  $m/e$  et non  $e/m$ ] est, je pense, due à la grande valeur de  $e$  ainsi qu'à la faible valeur de  $m$ . Il me semble que les charges portées par les corpuscules dans l'atome sont grandes comparées à celles portées par les ions dans un électrolyte* ». Il conçoit clairement un constituant universel de la nature (et même d'après lui le constituant universel de la nature), mais sans toutefois l'identifier à l'électron. Ainsi, Paul Langevin écrit dans sa thèse en 1902 : « *Nous conserverons pour ces particules cathodiques le nom de corpuscules proposé par le professeur J.J. Thomson. Celui d'électrons, également usité, est souvent employé dans un sens un peu différent.* ». Finalement, J.J. Thomson n'utilisera le mot électron pour désigner son corpuscule que vers 1911-1912. Enfin, ce dernier précise : « *Si les rayons cathodiques étaient des corpuscules chargés se déplaçant à haute vitesse, il s'ensuivrait que la taille de ces corpuscules devrait être petite comparée à celle des atomes ou molécules ordinaires.* »

### *La mesure de la charge et de la masse de l'électron*

J.J. Thomson réalise, en 1899, un pas de plus. Il mesure indépendamment, la charge  $e$  et le rapport  $e/m$  de son corpuscule.

Il introduit son article ainsi: « *Dans ces expériences [celles de 1897], seul le rapport  $m/e$  a été déterminé, et non pas les valeurs de  $m$  et  $e$  séparément. Il est par conséquent possible que la petitesse du rapport soit due au fait que la charge  $e$  soit plus grande que celle portée par un ion dans un électrolyte, plutôt que parce que la masse  $m$  soit très faible.* » Il rappelle qu'il a pu montrer en 1898, que la charge  $e$  produite par effet photoélectrique (sur des gaz par des rayons X) est bien « *du même ordre de grandeur que la charge portée par un atome d'hydrogène dans une expérience d'électrolyse* » et qu'en conséquence « *la masse du porteur est seulement de l'ordre du millième de celle d'un atome d'hydrogène.* » Finalement, J.J. Thomson, grâce à une méthode suggérée par son assistant C.T.R. Wilson (production de gouttelettes dans une vapeur sursaturée avec des « électrons » comme germes), parvient à déterminer  $e$ , et, connaissant  $e/m$ , à en déduire la masse  $m$  du « corpuscule ». Thomson termine son article en introduisant ce qui deviendra le modèle d'atome de Thomson (modèle dit du *plum pudding*). Il fait pour cela explicitement référence à la découverte de Zeeman (voir encadré): « *La raison pour laquelle je crois qu'il y a beaucoup plus de corpuscules dans un atome qu'un ou deux, est lié à l'effet Zeeman. Le rapport  $m/e$  déterminé par cet effet est du même ordre de grandeur que celui que nous avons trouvé pour les corpuscules libres ; et les charges portées par ces particules mobiles, par lesquelles l'effet Zeeman est interprété, sont toutes négatives. Maintenant, s'il n'y avait qu'un ou deux de ces corpuscules dans un atome, nous devrions nous attendre à n'observer qu'une ou deux raies dans le spectre observé par Zeeman... Nous concluons qu'il y a un nombre considérable de corpuscules dans un atome d'une substance donnant ce spectre.* » En 1900, Pierre et Marie Curie montrent que les rayons  $\beta$  des corps radioactifs sont également de même nature que les rayons cathodiques. Millikan confirmera en 1909, par des mesures très précises, la charge de l'électron.

### Lorentz, Zeeman et l'électron

L'électron a été découvert quelques mois avant les publications de J. J. Thomson par Lorentz et Zeeman. Lorentz, dès 1875, développe la théorie électromagnétique de Maxwell et comprend qu'il faut distinguer d'une part, le champ, d'autre part, les particules chargées en interaction avec ce champ. Ce point est à la base de sa *Théorie des électrons*. Dans les années 1896-1897, dans le cadre de travaux qu'il réalise avec son assistant d'alors, Zeeman, les deux physiciens donneront la première évidence de l'existence de l'électron (découverte et interprétation de l'effet Zeeman). Leurs travaux, justement récompensés par l'attribution du prix Nobel de 1902, conduiront à la première détermination du rapport  $e/m$ <sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Pour en savoir plus, voir par exemple : *H. A. Lorentz et la naissance de la physique moderne*, Jean-Claude Boudenot & Jean-Jacques Samuëli, Éd. Ellipses, 2005.

# Interprétation de l'effet Branly

---

## *Plus d'un siècle de recherche*

Branly indique à la fin de sa vie : « J'ai réalisé quelques milliers d'expériences avec mes limailles, plusieurs centaines ont été nécessaires avant que je fasse ma communication à l'Académie des sciences en 1890, et ce ne fut qu'après de longues études que je compris le rôle que jouait, à distance comme à proximité, l'étincelle à haut potentiel, sur un récepteur sans aucun lien matériel avec l'émetteur ». Notre savant chercha sans relâche l'origine de l'« effet Branly », c'est-à-dire, l'effet de chute de résistance provoquée par une oscillation hertzienne. On a vu plus haut que Branly réfutait, expériences à l'appui, l'interprétation de Lodge suivant laquelle il se produirait une « cohésion » des particules. Selon Lodge, la différence de potentiel entre les grains ferait apparaître des étincelles entre ces grains dont le résultat serait de les souder entre eux. D'autres auteurs suggéraient que ces étincelles perçaient la couche isolante qui recouvre naturellement les grains métalliques, les mettant ainsi, en contact électrique. On a également suggéré que l'effet serait consécutif à une force d'attraction électrostatique s'exerçant entre les grains.

Notons que, d'une façon générale, l'attention des chercheurs s'est portée plus sur le comportement des contacts soumis à des tensions continues (aux bornes du tube à limaille) qu'au véritable effet Branly, induit par onde électromagnétique. Le premier cas de figure est en effet plus favorable à la fois à l'expérimentation et à la modélisation.

Après la mort de Branly, en 1940, il n'y avait plus guère de physiciens pour s'intéresser à ce phénomène. Mais au début des années 1960, un groupe de physiciens de Lille, tout particulièrement le professeur Gabillard et son élève Georges Salmer ont de nouveau soulevé le problème de l'interprétation de l'effet Branly. Ils ont suggéré que les grains subissent une force d'attraction électrostatique en présence d'un champ électrique appliqué ainsi qu'une force moléculaire permettant de garder les particules en contact lorsque le champ est appliqué. En 1975, c'est un groupe de Grenoble qui propose un mécanisme de claquage électrique de la couche d'oxyde à la surface des grains. Plus récemment (1997), la transition vers l'état conducteur a été observée directement à l'aide d'une caméra infrarouge. Il apparaît des chemins de conduction lorsqu'une forte différence de potentiel (plus de 500 V) est appliquée à une monocouche de billes. Des chercheurs de l'ENS de Lyon viennent de montrer que la transition dans une chaîne de billes résulte de l'échauffement local des microcontacts jusqu'à leur fusion locale (vers 1000 °C) et ce, même lorsque la tension appliquée est très faible (jusqu'à 0,4 V par contact).

## Édouard Branly, un précurseur des nanotechnologies ?

Peut-être l'effet Branly est-il à la frontière de la physique mésoscopique. Il est presque certain que ce domaine de recherche contemporain aurait passionné notre savant. On appelle physique mésoscopique, la physique qui étudie des propriétés qui se trouvent à la frontière entre le comportement classique et le comportement quantique. On peut également la voir comme étant liée à l'étude de larges systèmes quantiques, c'est-à-dire concernant des matériaux dont la dimension va de quelques nanomètres à quelques dizaines de microns. Comment distingue-t-on un comportement classique (observé à l'échelle macroscopique), d'un comportement mésoscopique ? La réponse la plus simple consiste sans doute à dire que, tandis qu'un objet classique possède des propriétés indépendantes de sa taille (comme la température de fusion), il n'en va pas de même pour un objet mésoscopique. Un exemple illustre bien ce point : la température de fusion de l'or est de 1064 °C, mais si l'on prend un cube d'or dont le côté n'a que 4 nm, sa température de fusion n'est plus que de 900 °C, si la dimension du cube descend à 3 nm, elle n'est plus que de 800 °C et elle tombe à 500 °C pour une dimension de 2 nm.

Alors que les premières recherches d'Édouard Branly ont concerné la conductivité de toutes sortes de substances (1888-1889), il est actuellement démontré qu'en régime quantique, la conductance est quantifiée. Ce phénomène peut être regardé comme un effet mésoscopique associé à la quantification des ondes électroniques. Le quantum de conductance ( $G$ ) s'exprime en fonction de constantes fondamentales (il vaut  $e^2/h$ , où  $e$  est la charge de l'électron et  $h$  la constante de Planck). Inversement, la résistance est quantifiée (c'est en fait ce qui a d'abord été découvert grâce à l'effet Hall quantique) et comme le quantum de résistance est relié aux constantes fondamentales (il vaut  $h/e^2$ ), il est maintenant utilisé par la plupart des Instituts nationaux comme résistance étalon primaire (la résistance étalon vaut donc  $h/e^2 = 25\,812,807\ \Omega$ ).

Depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle, le développement des nanotechnologies est en très forte croissance. Déjà le champ couvert par ce nouveau domaine est immense.

### **Le nanomètre, une échelle aux conséquences surprenantes**

Si l'on considère une nanostructure en silicium de surface 10 nm × 10 nm et d'épaisseur 10 nm, même avec un dopage de  $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ , elle ne contiendra (en moyenne !) qu'une seule impureté ! La différence de potentiel, apparaissant aux bornes d'une telle structure lorsque l'on dépose un électron sur l'une des faces, atteint la valeur macroscopique de 0,2 V. L'électron lui-même ne peut plus être considéré comme une particule, à cette échelle son comportement ondulatoire prédomine.

Neal Lane,  
ancien conseiller  
du Président  
américain pour  
les sciences et les  
technologies,  
indiquait : « Si  
l'on me demandait  
quel domaine des  
sciences et  
techniques  
produira  
vraisemblablement  
les plus grandes  
ruptures, je  
répondrais les  
sciences et les  
techniques à  
l'échelle  
nanométrique ».

La microélectronique a fait ces quarante dernières années des progrès fulgurants. La diminution constante de la surface de silicium occupée par les composants a donc permis de maintenir la course à l'intégration à un rythme édicté par la fameuse « loi de Moore » (Gordon Moore, co-fondateur de la firme Intel) qui prévoit que le nombre de transistors par circuit intégré double tous les 18 à 24 mois environ. Cette remarquable observation, formulée dès 1965, a été vérifiée jusqu'à présent. Alors qu'en 1971, le premier circuit d'Intel

## **Quelques applications potentielles des nanotechnologies**

- Informatique et stockage de données

Processeurs ayant une très faible consommation et un très faible coût permettant l'augmentation de l'efficacité des ordinateurs par un facteur un million. Mémoires ayant une capacité de plusieurs Tbit (1 Tbit = 1000 Gbit). Nanocapteurs ayant des capacités de calcul et de communication de très faible dimension, poids et consommation. Augmentation des fréquences de communication avec utilisation du spectre optique permettant une augmentation considérable de la bande passante. Calcul quantique avec, en particulier, des applications dans le domaine de la communication sécurisée (cryptographie quantique).

- Matériaux

Utilisation des nanotubes de carbone, 10 fois plus résistants que l'acier et 2 fois plus légers que l'aluminium. Surface autonettoyante, effet lotus : la poussière ne s'accroche pas. Matériaux intelligents (vêtements dont les propriétés s'adaptent automatiquement à l'environnement, en particulier à la température).

- Santé et médecine

Réalisation de dispositifs de type « sous-marin » nanoscopique pouvant, dans un avenir proche, être utilisés pour pénétrer dans les vaisseaux sanguins afin de tuer des microbes, de corriger des erreurs génétiques, de supprimer des cellules cancéreuses ou de réparer des tissus.

- Énergie et environnement

Développement de sources d'énergie propres et bon marché. Meilleure utilisation de l'énergie, en particulier par le développement de sources d'éclairage domestique et industriel très efficaces (ces nouveaux types d'éclairage peuvent réduire la consommation totale d'électricité de 10 % et réduire l'émission de CO<sub>2</sub> de l'équivalent de 28 millions de tonnes par an).

comportait environ 2000 transistors, le processeur Itanium™ en comporte aujourd'hui plus de 200 millions, et dans un avenir proche, les prochains microprocesseurs en contiendront plusieurs milliards. La règle initiale de Moore est tellement bien vérifiée depuis les débuts de la microélectronique, qu'elle est devenue, au fil des années, force de « loi » et qu'elle a fini par s'imposer comme une prédiction à caractère quasi déterministe. Cependant, pour la première fois depuis plus de quarante ans, la course à l'intégration est sur le point de se heurter à des limites d'ordre physique et technologique. Le transistor conventionnel ne parviendra probablement pas à surmonter ces problèmes au-delà de l'horizon 2008-2010. Des solutions qui permettent de ne pas trop s'éloigner de la loi de Moore sont toutefois entrevues jusqu'à l'horizon 2015-2016. Dès maintenant, des composants du commerce de largeur de grille de 90 nm (et même un peu moins) sont en production. Mais il faut préparer le futur et étudier, en parallèle, des solutions alternatives comme l'électronique moléculaire. La nouvelle électronique sera donc probablement moléculaire, elle utilisera les électrons et les photons à l'unité, le spin sera vecteur d'information, le nanomagnétisme permettra de concevoir des mémoires sans alimentation et la lithographie sera remplacée par des mécanismes d'auto-assemblage. Les nanosciences résultent de la convergence entre plusieurs spécialités, en particulier la technologie, la physique, la chimie et la biologie.



# 4

## Le développement de la TSF

---

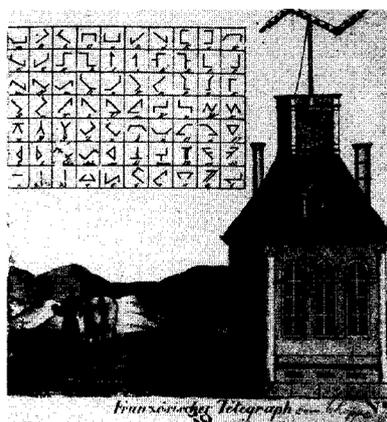
### Des premiers télégraphes aux sémaphores de Chappe

---

Le désir de communiquer à distance remonte à la nuit des temps et les premières réalisations se sont faites par voie optique. Ainsi, au temps des grecs, on peut lire dans l'Agamemnon d'Eschyle (525-456 avant J.-C.) le texte suivant : « *Un signal a fait allumer un autre signal ; aux premiers feux aperçus sur le mont Ida, les signaux ont répondu des sommets de la montagne consacrée à Mercure, dans l'île de Lemnos* ». C'est par cette méthode que la nouvelle de la prise de Troie a été transmise de Troie à Argos. Vers 330 avant J.-C., le tacticien grec Enée utilise des signaux visuels codés. Toujours en Grèce, Polybe (150 avant J.-C.) améliore le procédé en ayant recours à des signaux alphabétiques transmis par deux groupes de cinq torches séparées. Les Romains utilisent aussi ce type de communication. C'est ainsi que César peut communiquer avec l'ensemble de ses armées jusqu'aux extrémités de son Empire. Des relais, constitués par des tours fixes, étaient répartis tout autour de la méditerranée, il y en avait, dit-on, plus de 1200 en Italie et autant en Gaule. La communication se faisait également optiquement au moyen de torches. Les romains faisaient apparaître des torches enflammées en haut d'une tour. Une combinaison de six torches sur la gauche et six sur la droite permettait de transmettre les lettres d'un message suivant un code. Mais il faut attendre le

XVII<sup>e</sup> siècle pour trouver un premier exposé clair et cohérent de la télégraphie visuelle. Il est fait par Robert Hooke, le grand rival de Newton, devant la Royal Society, en 1684. Le système de Hooke est constitué d'un châssis muni d'un écran noir sur une moitié de sa largeur. Les signaux, constitués de lettres de l'alphabet ou d'expressions, sont cachés derrière cet écran noir et glissés lors de la transmission vers l'autre moitié du châssis qui est vide de sorte que ces signaux apparaissent sur un fond de ciel clair. L'allemand Franz Kessler est le premier, en 1616, à utiliser une lunette afin de mieux observer les signaux. En France, Guillaume Amontons utilise également cette technique, à partir de 1690, pour observer les signaux émis par des postes fixes.

Télégraphe de  
Chappe.



### La naissance de la lunette

La première lunette remonte à 1590 et Giambattista della Porta en est l'inventeur. Il semble que l'invention ait été tenue secrète à cause de ses usages militaires, mais on la retrouve finalement en Hollande. En 1608, Hans Lippershey en améliore la qualité. À partir de vagues descriptions, Galilée fabrique également une lunette et la présente aux membres du Sénat de Venise, le 21 août 1609. Fort de son succès auprès des notables vénitiens, il en construit une autre de plus forte puissance avec laquelle il fera de l'astronomie. Comme l'indique le père Mersenne : « Galilée ! Qui sera capable de dénombrer ses découvertes ? Avec sa seule lunette, il a presque trouvé plus de choses qu'on n'en connaissait déjà ». En effet, entre la fin de 1609 et le début de 1610, il réalise une véritable moisson de découvertes : relief de la Lune, nature stellaire de la voie lactée, satellites de Jupiter, apparence changeante de Saturne, phases de Vénus, taches solaires, rotation du Soleil sur lui-même, etc.

En 1792, le mot télégraphe apparaît grâce aux travaux du français Claude Chappe. Très intéressé par les expériences de physique, il réussit à faire la synthèse des efforts réalisés avant lui pour transmettre rapidement un signal sur de longues distances. En utilisant un système à cadrans, il transmet, au début mars 1791, un message sur une distance de 14 km entre Brûlon et Parcé. Grâce à son frère Ignace, qui est membre de l'assemblée législative, il peut poursuivre ses travaux à Paris. Son système de bras télégraphique est de nouveau testé le 12 juillet 1793 avec succès, sur 40 km entre Saint-Martin du Tertre et Ménilmontant. Claude Chappe est nommé, le 27 juillet 1793, « ingénieur télégraphe ». Peu après l'exécution de Louis XVI, en janvier 1793, les ennemis menacent le nord de la France et il est décidé d'entreprendre la construction de la toute première ligne sémaphorique entre Paris et Lille. Cette ligne est achevée le 16 juillet 1794, elle est équipée de seize postes, chaque poste étant lui-même constitué de bras mobiles pouvant prendre cent quatre-vingt-seize positions élémentaires. Peu de temps après, le 1<sup>er</sup> septembre 1794, Lazare Carnot annonce devant la convention : « *Citoyens, je vous annonce une grande nouvelle qui réchauffera vos cœurs. Les autrichiens sont en déroute, la place forte de Condé dont ils étaient les maîtres vient de nous être rendue. C'est ce que nous annonçons à l'instant le télégraphe Chappe, établi par vos soins* ». Cet événement va consacrer le télégraphe.



Claude Chappe  
(1763-1805).

Lazare Carnot est issu d'une famille de 18 enfants. Il étudie à l'École du génie de Mézières (l'ancêtre de Polytechnique) où il est l'élève de Monge. Lazare Carnot est chargé en 1793, des questions militaires au Comité de Salut Public. C'est alors que le surnom d'« Organisateur de la victoire » lui est attaché. Membre du Directoire en 1795, il joue le rôle de ministre de la Guerre et envoie Bonaparte en Italie. Passionné de sciences, il est élu à l'Institut en août 1796. En 1799, il est nommé officiellement ministre de la Guerre (par Bonaparte !). Il sera ministre de l'Intérieur dans le Gouvernement des Cent-Jours (1815). Sadi Carnot, le père de la thermodynamique, est le second fils de Lazare Carnot.

En mai 1798, on met en service une ligne Paris-Strasbourg et l'année suivante, c'est la ligne Paris-Brest qui est opérationnelle. En 1800, le réseau télégraphique français couvre mille deux cent cinquante-trois kilomètres. Toutefois, Bonaparte voulant mettre fin aux désordres révolutionnaires, décide de mettre en sommeil l'extension prévue du réseau. En 1805, Claude Chappe, fatigué de lutter pour défendre ses projets et affaibli physiquement, se suicide en se jetant dans le puits de sa maison où était installé l'atelier du télégraphe. Il venait d'avoir 42 ans.

## Les Chappe, une sacrée famille

L'oncle de Claude Chappe, Jean Chappe d'Auteroche est astronome et géologue. Membre de l'Académie des sciences, il est célèbre pour avoir participé aux expéditions organisées à l'occasion du transit de Vénus (dont l'enjeu était la détermination de la distance Terre-Soleil). Claude Chappe naît le jour de Noël à Brûlon dans la Sarthe. Tout jeune, avec ses frères, il s'amuse à communiquer à distance grâce à un piquet et à des planchettes orientables. Après ses études au collège royal de la Flèche, il est nommé abbé et ouvre un cabinet de physique. Il s'intéresse à l'électricité et invente même un électromètre. Ignace Chappe est l'aîné des frères Chappe, il sera procureur, puis député de la Législative. On lui doit une « *Histoire de la télégraphie* » (1823). Pierre François Chappe est receveur du timbre et participera aux premières expériences de télégraphie de son frère Claude. René Chappe est d'abord receveur des domaines du Roi. Il s'implique également dans le développement du télégraphe et sera nommé administrateur des télégraphes. Abraham Chappe est le plus jeune des frères. Il supervise les travaux des lignes télégraphiques Paris-Lille, Paris-Strasbourg et Paris-Brest. Toute sa vie, il défendra les intérêts du télégraphe optique.

Le progrès apporté par le télégraphe optique est toutefois considérable : alors qu'il fallait quatre jours en 1790, pour porter par diligence un message de Paris à Strasbourg, l'utilisation des sémaphores permet, en 1799, la transmission du même message en deux heures. Les quatre frères de Claude Chappe décident de reprendre le flambeau. Le réseau télégraphique des Chappe atteindra quatre mille huit cents kilomètres en 1852 et comptera jusqu'à cinq cent cinquante-six stations.

### Le télégraphe optique

Le télégraphe est placé sur une hauteur, il est porté soit par un monument existant (clocher d'église, tour de château, etc.), soit par une construction spécifique. On parle dans les deux cas d'une station télégraphique. La pièce maîtresse est constituée par des bras articulés dont chaque position représente une lettre ou un chiffre. Les bras mobiles peuvent prendre cent quatre-vingt seize positions élémentaires. Les messages sont constitués d'une suite de signaux « sémaphoriques » qui sont lus sur la tour précédente à l'aide d'une lunette et reproduits pour être lus sur la tour suivante. L'opérateur,

qui traduit le code et le renvoi, joue donc le rôle de répéteur. Les stations sont distantes en moyenne d'une dizaine de kilomètres et elles sont équipées de lunettes permettant la lecture du signal distant. Lorsque le télégraphe optique sera complètement opérationnel, il pourra transmettre sur 700 km en seulement 20 minutes. L'inconvénient principal est qu'il ne fonctionne ni la nuit, ni par temps de brouillard. Il sera remplacé rapidement par le télégraphe électrique à partir des années 1850.

## Le télégraphe électrique de Morse

---

En février 1825, Samuel Morse est à Washington pour faire le portrait de La Fayette. Pendant son absence, sa femme décède soudainement, et compte tenu de la lenteur des communications (courrier à cheval), il ne peut lui faire ses adieux. Ce tragique événement le conduira au développement de la télégraphie électrique. De retour d'un voyage en Europe où il est venu étudier les maîtres de la peinture et a découvert, subjugué, le télégraphe optique, il embarque le 8 octobre 1832 sur le

### Ampère invente un télégraphe électrique

Le 2 octobre 1820, dans une communication à l'Académie des sciences, Ampère indique « *qu'on pourrait former une sorte de télégraphe...* ». Il décrit précisément son idée dans son « Recueil d'observations électrodynamiques » de 1822 de la façon suivante : « *D'après le succès de l'expérience que m'a indiqué M. le marquis de Laplace [c'est-à-dire le déplacement, constaté par Oersted, d'une aiguille aimantée par un courant], on pourrait, au moyen d'autant de fils conducteurs et d'aiguilles aimantées qu'il y a de lettres, et en déplaçant chaque lettre sur une aiguille différente, établir à l'aide d'une pile placée loin de ces aiguilles, et qu'on ferait communiquer alternativement par ses deux extrémités à celle de chaque conducteur, former une sorte de télégraphe propre à écrire tous les détails qu'on voudrait transmettre, à travers quelques obstacles que ce fût, à la personne chargée d'observer les lettres placées sur les aiguilles. En établissant sur la pile un clavier dont les touches porteraient les mêmes lettres et établiraient la communication par leur abaissement, ce moyen de correspondance pourrait avoir lieu avec assez de facilité, et n'exigerait que le temps nécessaire pour toucher d'un côté et lire de l'autre chaque lettre.* » Ampère, qui est alors totalement absorbé par le développement de l'électrodynamique, ne développe pas au-delà son idée. Par ailleurs, son télégraphe présente un inconvénient important, il nécessite un câble à 26 conducteurs ! (36 si l'on tient compte des chiffres aussi indispensables que les lettres).

voilier Sully. Au cours de la traversée d'une durée de 37 jours, il rencontre le docteur Jackson – médecin de Philadelphie féru de sciences – qui lui commente les découvertes récentes d'Oersted (1819) et d'Ampère (1820) sur le courant électrique et son action.

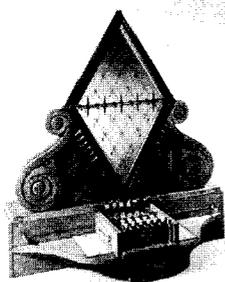


Samuel Morse.

En arrivant à New York le 16 novembre 1832, Morse dit au commandant du bateau : « *Si vous entendez un jour parler de télégraphe électrique, souvenez-vous qu'il a été inventé à bord de votre bateau* ». En effet, les longues conversations que Morse entretenait avec le docteur Jackson l'avaient conduit à imaginer l'utilisation de l'électro-aimant (qu'Ampère et Arago avaient inventé en 1820) pour attirer et relâcher, à volonté, une pièce en fer doux pour établir un télégraphe. Par ailleurs, il invente (en 1840) le célèbre alphabet qui porte son nom. Peu après, Morse est nommé professeur de littérature relative aux arts du dessin à l'Université de New York. En parallèle, il fait ses premières réalisations de télégraphe électrique. Il effectue une démonstration réussie en 1837 en transmettant sur 500 m, une première phrase : « *Attention à l'univers* ». En janvier 1838, la liaison atteint plus de 3 km.

### Les conséquences du brouillard londonien

Le télégraphe électrique s'est rapidement imposé en Angleterre pour des raisons climatiques : le brouillard n'est en effet pas propice aux communications par télégraphie optique. Une anecdote décrit bien une mésaventure liée au fameux « fog » anglais. En 1815, un télégraphe de Londres reçoit le message suivant : « *Wellington defeated* » (Wellington vaincu), mais le brouillard stoppe la suite du message. On croit à la défaite de Wellington ce qui entraîne une chute brutale du cours de la bourse. Le message transmis stipule en réalité « *Wellington defeated the French at Waterloo* » (Wellington a vaincu les français à Waterloo). Seuls les frères Rothschild ont reçu à temps le bon message grâce à une transmission par pigeons voyageurs. Ils profitèrent de la chute de la bourse et de la connaissance de la victoire pour spéculer et faire fortune !



Télégraphe de Wheatstone exploité en Angleterre dès 1838.

Indépendamment, à la même époque, des savants européens réalisent les premiers télégraphes électriques. Le plus fameux est celui de Gauss et Weber qui date de 1833. Ils réussissent une liaison de trois kilomètres entre le laboratoire de physique et l'observatoire de Göttingen. La transmission, qui se fait sur cinq fils en parallèle, est plus complexe que celle imaginée par Morse peu après. Charles Wheatstone, en 1837, développe également un télégraphe qui utilise le déplacement d'aiguilles sous l'effet du courant. Tandis qu'en Angleterre, le système de Wheatstone est exploité dès 1838, sur une partie de la ligne du

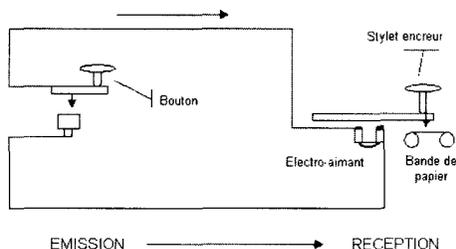
chemin de fer reliant Londres à Liverpool, aux États-Unis, le sénat américain débloque, le 3 mars 1843, des fonds pour la construction de la première ligne de télégraphe électrique qui reliera Washington à Baltimore (600 km) suivant le système proposé par Morse. Le 24 mai 1844, depuis la chambre du Tribunal suprême à Washington, est transmis le message tiré de la Bible : « *Qu'est-ce que Dieu a forgé ?* » En France, les premiers essais sérieux commencent en 1845. Il faut dire que le nouveau système bénéficie d'un défenseur de poids en la personne de François Arago. Dans un discours en date du 2 juin 1842, qu'il prononce à la Chambre des députés, il déclare : « *Nous sommes à la veille de voir disparaître non seulement les télégraphes de nuit, mais encore le télégraphe de jour actuel. Tout cela sera remplacé par les télégraphes électriques qui transmettront les dépêches à toutes distances, quelque temps qu'il fasse, avec une vitesse incroyable* ». Les télégraphes utilisés alors (modèle de Wheatstone, modèle de Foy-Breguet), sont assez complexes. Celui de Morse est au contraire, très simple. Il consiste en une clef montée sur un ressort, fixée sur une planchette. L'opérateur agit sur la clef par une pression plus ou moins rapide et prolongée, selon qu'il s'agit de reproduire les points ou les traits dont sont constitués les éléments du code.

### **Un allié solide : les chemins de fer**

Les chemins de fer apparaissent d'abord en Angleterre. C'est le 11 février 1825 précisément que le premier train, tracté par une locomotive à vapeur, emporte près de Cardiff, 70 passagers sur 15 kilomètres. En France, une loi est votée en 1825 pour donner une nouvelle impulsion à la construction des chemins de fer, mais plusieurs lignes existent déjà, certaines depuis plus de dix ans. Citons Lyon-Saint-Étienne-Roanne-Montbrison (163 km) ; Strasbourg-Mulhouse-Bâle (159 km) ; Lille-Valenciennes (45 km) ; Paris-Versailles (42 km), etc. Les lignes Paris-Rouen et Paris-Orléans sont en construction, le mot d'ordre est que les lignes devront traverser « *le royaume entier, d'une extrémité à l'autre, joindre le nord au midi, l'est à l'ouest, l'océan à la méditerranée* ». C'est également en 1842, qu'est inaugurée la première ligne expérimentale de télégraphie électrique construite parallèlement à la voie de chemin de fer reliant Paris à Versailles. Elle sera suivie en 1845, par une seconde ligne entre Paris et Rouen. Le télégraphe électrique est intimement lié au développement des chemins de fer car il permet de transmettre d'une gare à l'autre les ordres de signalisation. L'autre avantage à poser les lignes de télégraphie électrique le long des voies de chemin de fer est qu'elles sont ainsi, constamment surveillées. En Angleterre, en 1852, plus de six mille kilomètres de ligne sont installées.

Le télégraphe électrique se développe rapidement. Un premier essai de câble sous-marin entre la France (Cap Gris-Nez) et l'Angleterre (Cap Southerland) est réalisé en 1850. Il permet de montrer que le signal se propage bien sur les 40 kilomètres de câble. L'atténuation est importante, mais le signal est encore détectable. Toutefois, le câble, qui n'est pas armé, est rompu quelques heures seulement après cet essai par l'ancre d'un bateau de pêche ! On pose de nouveau un câble en 1851, et cette fois, le succès est complet. Il permettra de transmettre des communications entre la France et l'Angleterre par télégraphie pendant quinze ans (en 1866, le câble est coupé suite à une violente tempête).

### Principe du télégraphe de Morse.



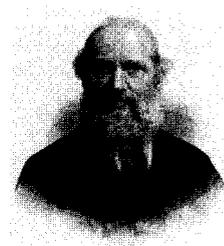
En 1854, la France adopte à son tour le télégraphe de Morse. On peut lire dans le *Moniteur universel* du 11 juin 1854 : « Dans ce moment, on fait avec succès, au poste central l'essai de l'appareil Morse, déjà adopté en Allemagne. Cet appareil joint à une grande exactitude, ce précieux avantage qu'il peut écrire lui-même la dépêche qu'il transmet, et la reproduire dans tous les postes d'une même ligne. De plus, n'exigeant qu'un fil quand les autres appareils en demandent deux, il procure une économie notable. Il offre, en outre, l'avantage de transmettre les dépêches directement à des distances presque indéfinies. Paris, par exemple, est actuellement en communication avec Vienne. »

En cette même année 1854, le physicien britannique William Thomson s'intéresse au télégraphe transatlantique. Les français viennent de poser un câble entre la Sardaigne et l'Afrique, mais dans le projet de Thomson, le câble reliant les deux continents de l'Irlande à Terre Neuve doit être quatre fois plus long. Il n'est pas évident qu'un signal puisse se propager sur une telle longueur. En effet, le câble se comporte comme un condensateur extrêmement long et les signaux se propagent en se déformant et en s'affaiblissant. William Thomson développe alors ce que les physiciens connaissent sous le nom de la « théorie des lignes de transmission » (équation des télégraphistes) et il montre que si l'on augmente le diamètre du câble, la pureté du cuivre qui le constitue et si l'on injecte suffisamment de puissance à l'entrée,

alors un détecteur ultrasensible de son invention (le « *Siphon-recorder* ») pourra lire le signal. L'enthousiasme du grand savant anglais permet de créer en 1856, l'*Atlantic Telegraph Company* et une première tentative de pose est faite dès l'année suivante. Elle se solde par un échec (suite à une fausse manœuvre, le câble est perdu). On recommence et finalement, le 5 août 1858, des signaux sont transmis à travers le premier câble transatlantique (qui relie Valentia en Irlande à Trinity Bay en Terre-Neuve). Le premier message : « *Gloire à Dieu sur terre et paix aux hommes de bonne volonté* » symbolise peut être l'espoir d'un monde plus uni grâce au progrès des communications. Malheureusement, le câble se casse quelques jours après et les investisseurs se découragent. Il faut attendre 1865 pour qu'une nouvelle tentative soit faite. Après quelques déboires, le succès est au rendez-vous l'année suivante. Le bateau qui réalise cette pose, le *Great Eastern*, est bientôt de nouveau à l'œuvre. Un second câble est posé entre l'Angleterre et l'Amérique, puis un troisième, en 1869, cette fois entre la France (Brest) et les États-Unis.

### Lord Kelvin

William Thomson est né à Belfast, en 1824. Dès l'âge de 12 ans, il s'inscrit à l'université et suit, avec son frère, les cours de son père James Thomson, professeur de mathématiques à l'Université de Glasgow. À 17 ans, il entre à l'Université de Cambridge et en sort second. Après un passage à Paris, dans le laboratoire du Collège de France de Regnault où il rencontre Cauchy, Liouville et Dumas, il revient à Glasgow en 1846. Il est alors nommé (à 22 ans) professeur de philosophie naturelle à l'université de cette ville. Il y restera 53 ans ! Le succès de la pose du premier câble transatlantique lui vaudra, en 1892, le titre de Lord Kelvin. À sa mort, en 1907, il sera enterré à l'abbaye de Westminster, à côté de Newton. Parmi ses nombreuses contributions à la physique, citons l'invention du galvanomètre à miroir (qui lui a permis de détecter les premiers signaux transatlantiques), l'électromètre à quadrants, l'étude de la diffusion des gaz qui a conduit à la fameuse « détente de Joule Thomson », ainsi que la notion de température absolue (échelle dont l'unité sera appelée : « degré Kelvin » :  $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$ ).



William Thomson  
(Lord Kelvin)  
(1824-1907).

La télégraphie se développe rapidement. En 1873, il y a dans le monde, deux millions de kilomètres de lignes. Notons enfin que la première conférence télégraphique internationale (ancêtre de l'Union Internationale de Télégraphie, l'UIT) adopte le code Morse en 1865, que Graham Bell invente le téléphone en 1876 et que Strawger réalise le premier sélecteur pour central téléphonique automatique en 1891.

## La naissance du téléphone

Si le téléphone a été bel et bien inventé et baptisé ainsi par Alexander Graham Bell en 1876, un français, Charles Bourseul en avait anticipé le principe plus de vingt ans plus tôt. On peut lire, sous sa plume, dans *L'Illustration* du 25 août 1854, la description prémonitoire suivante : « *Imaginez que l'on parle près d'une plaque mobile assez flexible pour ne perdre aucune des vibrations produites par la voix, que cette plaque établisse et interrompe successivement la communication avec une pile, vous pourrez avoir à distance une autre plaque qui exécutera, en même temps, exactement les mêmes vibrations. Quoi qu'il arrive, il est certain que, dans un avenir plus ou moins éloigné, la parole sera transmise à distance par l'électricité* ». Charles Bourseul en a rêvé, Graham Bell l'a fait ! Ce dernier a d'ailleurs eu beaucoup de chance, car un autre américain, Elisha Gray, dépose le même jour un brevet pour la même invention mais... deux heures plus tard ! De plus, la description faite par Elisha Gray est, disons-le, plus claire, nette et précise que celle de Bell. L'inévitable se produit, un procès entre les deux inventeurs, dont Bell est sorti vainqueur. William Thomson qualifie la découverte de Bell de « merveille des merveilles ». Dès 1876, Bell réalise une transmission téléphonique sur 450 km et William Thomson sur 400 km.

## Branly, Popoff et Marconi

---

Rappelons que c'est le 24 novembre 1890 qu'Édouard Branly découvre le phénomène de « radioconduction » : l'action d'une décharge électrique générée par un oscillateur de Hertz fait chuter la résistance de son tube à limaille de « *plus de 2 millions d'ohm à moins de 2. La chute de résistance disparaît en frappant quelques petits coups secs sur la tablette qui supporte le tube* ». Nous avons également déjà indiqué que le 12 janvier 1891, dans une nouvelle communication à l'Académie des sciences, Branly démontre qu'une tige métallique annexée au générateur « *augmente notablement la portée d'une étincelle d'émission* » (la portée, alors limitée à une dizaine de mètres, atteint maintenant 80 m). Toutefois, Édouard Branly ne revendiquera pas l'invention de l'antenne<sup>1</sup>, il soutiendra même Popoff dans ses revendications. De même, il ne s'attribuera jamais la paternité de la TSF, mais, comme il le

---

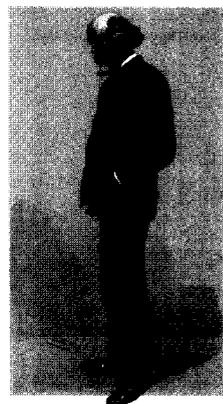
<sup>1</sup> Cette revendication aurait cependant été justifiée, puisque, outre son article dans les CRAS, Branly signale l'usage de l'antenne dans d'autres publications, en particulier dans le journal *Le Cosmos* du 30 mars 1891 et dans le journal *La lumière électrique* du 16 mai et du 13 juin 1891.

dit lui-même : « *Si je n'ai pas fait de TSF, mes expériences, sous la forme même où je les ai décrites, renferment en germe toute la TSF et même toute application dans laquelle il conviendra d'opérer l'ouverture ou la fermeture d'un circuit électrique à distance* ». En effet, c'est bien le radioconducteur de Branly qui va « lancer », comme nous allons le voir à présent, la radio.

Dès 1892, Oliver Lodge reprend ce qu'il appelle le « cohéreur de Branly » et y ajoute un système automatique de frappeur. De son côté, en installant un cohéreur de Branly au pied d'un fil de paratonnerre pour capter les signaux de foudre, Alexandre Popoff (ré)invente en 1893 l'antenne. L'année suivante, Oliver Lodge réalise en Angleterre, les premiers essais de télégraphie hertzienne sur quelques dizaines de mètres, tandis qu'aux antipodes, en Nouvelle-Zélande, Ernest Rutherford établit un record de distance (il vient d'effectuer sa thèse sur l'aimantation du fer sous l'effet de décharges électriques de hautes fréquences). Le 7 mai 1895, Alexandre Popoff fait fonctionner son appareil de TSF, constitué d'un éclateur de Hertz, d'un détecteur de Branly et d'une antenne devant la Société de Physique de Saint-Petersbourg. Pour célébrer cet événement, la date du 7 mai est devenue en Russie, la journée de la radio<sup>2</sup>.

L'année suivante, le 24 mars 1896, Popoff transmet un message en morse sur 250 m (entre deux locaux de l'Université de Saint-Petersbourg). Ce message est composé de deux mots : « *Heinrich Hertz* ». Branly commentera ainsi les travaux de Popoff : « *La télégraphie sans fil résulte réellement des essais de Popoff. Le savant russe a développé une expérience que j'avais souvent réalisée et que j'ai reproduite en 1891, devant la Société des électriciens [l'actuelle SEE] : une étincelle inactive à une distance d'une dizaine de mètres devient active quand on la fait circuler dans une longue tige métallique [antenne]* ».

Guglielmo Marconi naît le 25 avril 1874 d'un père italien, Giuseppe Marconi et d'une mère anglaise, Annie Jameson. Il doit sa passion pour l'électricité à la lecture de deux ouvrages : l'un concerne la vie et l'œuvre de Benjamin Franklin, l'autre est une reproduction des conférences sur l'électricité données par Faraday à la *Royal Institution*. Grâce aux relations de son père avec le professeur Augusto Righi (dont les travaux portent sur l'émission d'ondes électromagnétiques), le jeune Guglielmo peut accéder à la bibliothèque de l'Université de Bologne ainsi qu'au



Oliver Lodge  
(1851-1940).



Alexandre Popoff  
(1859-1906).

<sup>2</sup> Marconi rencontrera Popoff en juillet 1902. Ce dernier visitant une installation de Marconi, lui dit : « *Je viens rendre hommage au père de la radio* », ce à quoi Marconi lui répondit : « *Mais je pourrai être votre fils* » en faisant allusion, non seulement à l'âge de son interlocuteur, mais également à son antériorité dans les premiers essais de TSF.

## Cohéreur ou radioconduction ?

Lodge propose une explication du fonctionnement du tube à limailles de Branly. Le champ électrique de l'onde produit des forces attractives entre les grains de limaille qui, après de microscopiques déplacements, les font entrer en cohésion les uns avec les autres en formant entre les électrodes du tube des chaînes conductrices du courant électrique. Ensuite, un choc (comme l'a signalé Branly) suffit pour briser ces chaînes fragiles et restituer au tube sa résistance électrique initiale élevée. Cette interprétation est à l'origine du nom de cohéreur donné par Lodge au tube à limaille. Mais Branly, en désaccord avec cette explication, multipliera toute sa vie des expériences destinées à la mettre en défaut. Pour réfuter l'hypothèse de Lodge, Branly fabrique des bâtonnets formés de limailles métalliques noyées dans un isolant solide. Certains de ces bâtonnets ont une dureté comparable à celle du marbre. Dans ce cas, « *de quelle façon les particules conductrices cheminent-elles à travers l'isolant solide pour s'aligner ?* » écrit Branly dans les Comptes Rendus de l'Académie des sciences du 12 février 1894. Puis, pour prouver de façon encore plus convaincante que les grains de limaille ne bougent pas, Branly imagine une autre expérience où il les remplace par une colonne de six grosses sphères d'acier ou par un empilement de disques métalliques. Il écrit alors : « *Quel changement d'alignement évoquera-t-on dans le cas d'une colonne de lourdes billes d'acier, dans une colonne de larges disques de fer ou d'aluminium ? Pourtant, ces colonnes constituent des radioconducteurs au même titre que les tubes à fines limailles* ». Branly propose alors deux hypothèses possibles pour interpréter l'effet de radioconduction. Suivant la première hypothèse, l'isolant interposé entre les particules conductrices devient conducteur par l'action passagère d'un courant « de haut potentiel ». La deuxième hypothèse consiste à admettre qu'il n'est pas nécessaire que les particules d'un conducteur soient en contact pour livrer passage à un courant électrique. Dans ce cas, « *l'isolant sert principalement à maintenir un certain intervalle entre les particules* » dit Branly.

laboratoire de physique du professeur. Dès 1894, année de la mort de Hertz, Marconi fait ses premiers essais de transmission sans fil d'une extrémité à l'autre du grenier de la maison familiale, la villa Griffone à Pontecchio près de Bologne. Il s'enferme dans le grenier de la maison et y travaille jour et nuit, oubliant de manger et de dormir. En 1895, persuadé que les ondes peuvent se propager à plusieurs kilomètres (la détection de la foudre à distance par Popoff lui en apportait la preuve), il continue ses essais, cette fois dans le jardin de la villa.

À la fin de l'été, il installe son récepteur de l'autre côté d'une petite colline proche de la maison et son frère, Alfonso, lui signale la réception de l'onde (observée sur le cohéreur de Branly) par un coup de pistolet. À la fin de l'année 1895, il parvient à transmettre un signal (le S du code Morse, soit trois points : ●●●) sur 2400 m. Dans son discours Nobel du 11 décembre 1909, Marconi se souviendra de ses premiers essais : « ... [Grâce au professeur Rosa de Livourne] je m'informais des dernières publications scientifiques, y compris les travaux de Hertz, Branly et Righi... Dans mes premiers essais, j'utilisais un oscillateur de Hertz et pour la détection, d'un cohéreur de Branly... [J'ai apporté] quelques améliorations, comme l'utilisation de réflecteurs à la fois pour l'émetteur et le récepteur, puis j'ai adopté l'émetteur de Righi ». Dans ses expériences de 1895, Marconi utilise à l'émission, un émetteur relié, d'une part à la terre et, d'autre part, à un fil d'antenne. De la même façon, le cohéreur de Branly utilisé à la réception était également relié à la terre et à un fil d'antenne, et mis en série avec un inscripteur Morse. Marconi essaie de trouver une aide financière auprès du ministère des Postes et télégraphes italiens. On l'encourage certes à poursuivre son travail, mais aucune aide ne lui est apportée. Persuadé de l'intérêt pratique de son invention, il se rend en Angleterre (rappelons que sa mère est anglaise), y dépose (à Londres) un premier brevet le 2 juin 1896 (qui sera complété le 2 mars 1897) et fait une première démonstration devant des officiels londoniens le 27 juillet 1896. L'intérêt de son dispositif pour les communications en temps de guerre et pour les communications navales n'échappe pas aux anglais et il trouvera là, le soutien (en particulier de William Preece, ingénieur en chef du Post Office) qu'il n'a pas obtenu dans son pays.



Marconi, vers 1897.

En septembre 1896, Marconi, grâce à une antenne portée par un cerf volant réussi en Angleterre (Salisbury Plain), une transmission sur 6 km, puis 12 km. Le 11 décembre de la même année, il donne, avec William Preece, une conférence publique à la célèbre *Royal Institution*, là même où Faraday quelques dizaines d'années plus tôt, exposait ses travaux avec le succès que l'on sait. Ses expériences de *Salisbury plain* reprennent en mars 1897. Il utilise alors deux gammes de longueurs d'onde. Des « grandes ondes » (70 à 300 m de longueur d'onde) qui peuvent se propager au-delà des obstacles et des monticules, et des « petites ondes » (6 cm de longueur d'onde) qu'il peut rendre directives à l'aide de réflecteurs paraboliques en cuivre.

En mai 1897, il réalise une liaison de 9 miles (15 km) à travers le canal de Bristol (près de Cardiff), entre les îles de Steep Holm et de Flat Holm. Il fait le même type de démonstration en Italie et réussit à franchir, toujours en 1897, une distance de 15 km dans le port de La Spezia. De retour en Angleterre, il fonde le 20 juillet 1897, la *Wireless Telegraph and Signal Company* et en est l'actionnaire principal (le 14 mars 1900, la

société sera rebaptisée *Marconi's Wireless Telegraph Company Ltd.*). En juin 1898, Marconi installe la première station de télégraphie commerciale. Le premier utilisateur n'est autre que Lord Kelvin qui lui déclare : « *Je veux être le premier à payer un message en reconnaissance du fait que votre système est à la fois utile et commercial* »<sup>3</sup>. Entre le 20 et le 22 juillet, Marconi assure un reportage en direct de la régates de Kingstown (avant le port de Dublin). Plus de 700 messages sont diffusés en morse pour le Daily Express. Le public est impressionné par la performance, et la Reine Victoria lui demande d'établir une liaison entre sa résidence de l'île de Wight et le yacht du Prince de Galles (futur Édouard VII), qui sera opérationnelle dès le début du mois d'août.

### Righi et son émetteur

Augusto Righi a joué un rôle important dans la formation de Marconi. Après l'annonce par Hertz de l'existence des ondes électromagnétiques, Righi reproduit les expériences du physicien allemand et étudie les propriétés optiques de ces ondes. Il observe que plus les sphères de l'excitateur de Hertz sont petites, plus les longueurs d'onde ( $\lambda$ ) émises le sont aussi. C'est ainsi qu'il réussit à émettre des ondes centimétriques ( $\lambda = 2,5$  cm) [à comparer aux longueurs d'onde les plus courtes (30 cm) obtenues par Hertz]. Par ailleurs, Righi, comme Sarasin et de la Rive à Genève, améliore l'oscillateur de Hertz en plaçant l'éclateur dans de l'huile de paraffine. Mais la modification apportée par Righi ne s'arrête pas là : son oscillateur comporte quatre sphères isolées les unes des autres. Les deux plus grosses sphères sont en regard l'une de l'autre et plongées dans l'huile, les deux autres plus petites sphères sont dans l'air, situées en regard de chacune des grosses sphères. Les petites sphères sont connectées à une bobine de Ruhmkorff et le système se met à osciller : l'interruption de la décharge dans l'huile de paraffine induit de façon électromagnétique, une décharge dans la direction opposée. Chaque ouverture et fermeture de l'interrupteur de la bobine génère une nouvelle série d'oscillations amorties. Cette configuration d'émetteur à trois éclateurs (un entre chaque sphère) permet en diminuant la capacité ( $C$ ) et la self ( $L$ ), de diminuer la longueur d'onde d'émission ( $LC\omega^2 = 1$ ). Ainsi, en diminuant  $LC$  on augmente  $\omega$  et donc la longueur d'onde  $\lambda = 2\pi c / \omega$ .

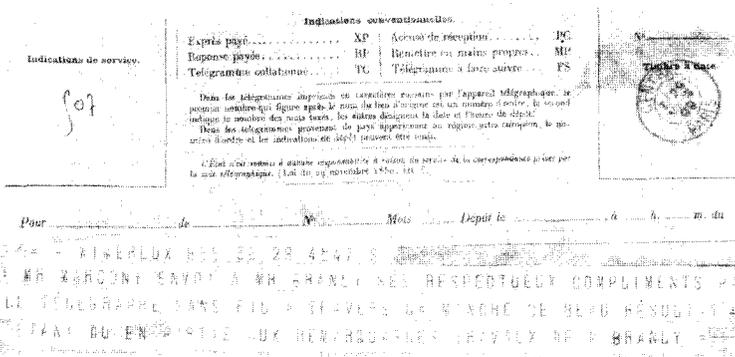
<sup>3</sup> L'appréciation de Lord Kelvin avait bien évolué depuis 1897, époque où il disait : « *Le sans fil c'est très bien, mais j'enverrai plutôt un message par un garçon sur un poney* ».

# Première liaison TSF transmanche et les débuts français de la TSF

En France, dès novembre 1897, Eugène Ducretet transmet un message entre son laboratoire, rue Claude Bernard, et le Panthéon (400 m). Fort de ce succès, il réalise un an plus tard, le 6 novembre 1898, une liaison entre la tour Eiffel et le Panthéon (4 km). Toujours en novembre 1898, un autre essai est mené, cette fois entre le Sacré-Cœur et l'Église Sainte-Anne (7 km).

Le 27 mars 1899, Marconi transmet le premier message entre l'Angleterre (South Fireland) et la France (Wimereux). Ce premier message est adressé à Édouard Branly : « M. Marconi envoie à M. Branly ses respectueux compliments pour la télégraphie sans fil à travers la Manche – STOP – Ce beau résultat étant dû en partie aux remarquables travaux de M. Branly – STOP ». Peu après, Branly répondra à ce message : « M. Branly remercie M. Marconi de son magnifique succès et lui exprime toute son admiration ». Les moyens mis en œuvre (antennes émettrice et réceptrice de 54 m hauteur) sont à la mesure de la performance : une liaison TSF internationale, longue de 51 km, avec un débit de 15 mots par minute. En juillet, Marconi poursuit ses essais, cette fois entre la mer et la côte et atteint une portée de 140 km. Il se persuade ainsi que ses liaisons peuvent dépasser l'horizon, il est donc prêt à aborder une nouvelle étape ; franchir l'atlantique avec les ondes ! Auparavant, le 26 avril 1900, Marconi dépose un brevet (son fameux brevet 7777) sur le principe de l'accord entre poste émetteur et poste récepteur (*tuned or syntonie telegraphy*)<sup>4</sup>, élément indispensable à une future utilisation pratique de la radio, et sans lequel il serait impossible de recevoir sélectivement les messages transmis par un émetteur donné.

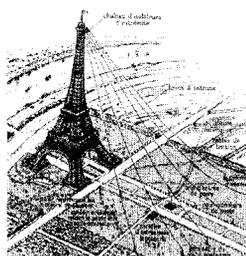
Télégramme de Marconi à Branly.



<sup>4</sup> Il s'agit de l'accord en fréquence entre l'émetteur et le récepteur. On peut également utiliser le terme de syntonie.

De son côté, le Capitaine Gustave Ferrié est envoyé par l'armée à Wimereux, dans le cadre de la commission interministérielle que le gouvernement a déléguée pour observer la transmission TSF transmanche de Marconi. Ferrié rédige un rapport convaincant sur l'intérêt et les perspectives de la télégraphie sans fil. Le ministre de la Guerre, M. de Freycinet, le charge alors d'étudier la réalisation en France, sans participation étrangère, des applications militaires de la TSF. Ferrié accepte et dira plus tard : « *De ce jour, ma carrière technique et scientifique fut définitivement fixée* ». En septembre 1899, les français réussissent en Bretagne une liaison marine de 42 km. Ducretet télégraphie à Tissot<sup>5</sup> et lui indique : « *Retour voyage – Dites à ministre que nous ferons aussi bien que les anglais – avec crédits... Amitiés – Ducretet* ».

Dès 1900, Ferrié met au point son « détecteur électrolytique ». Il est constitué d'une petite coupelle contenant de l'acide diluée. Des électrodes plongent dans le liquide et ne laissent passer le courant électrique que dans un seul sens. Ce nouveau détecteur, très sensible (0,007  $\mu\text{W}$  – soit  $7 \times 10^{-9}$  W – de puissance antenne contre 0,1  $\mu\text{W}$  – soit  $10^{-7}$  W – pour le cohéreur), permet l'écoute des signaux directement à l'oreille à l'aide d'un casque, c'est le début de la « lecture au son ». Cependant, le cohéreur de Branly continue à être utilisé car, contrairement au détecteur électrolytique de Ferrié, il peut se coupler à un enregistreur à bande papier. Tandis que, dès 1901, Ducretet publie un ouvrage sur *La télégraphie hertzienne sans fil aux grandes distances*, le Capitaine Ferrié s'entoure des précieux conseils d'André Blondel sur une série de solutions susceptibles d'améliorer les performances de la télégraphie sans fil. C'est ainsi que Ferrié réalisera des liaisons à grandes distances. Une des premières applications interviendra après l'éruption de la montagne Pelée le 8 mai 1902. La Martinique se trouve alors isolée du monde. Le 26 septembre, le Capitaine Ferrié s'embarque à Bordeaux et le 4 décembre il réussit une première communication entre la Martinique et la Guadeloupe (180 km). À partir du 21 janvier 1904, la Tour Eiffel est utilisée officiellement comme station de TSF. En 1908, toujours sous l'impulsion de Ferrié, la TSF démontre son utilité en temps d'hostilité au cours de la campagne du Maroc. Pour terminer, nous citerons ce beau portrait qu'a fait Louis de Broglie<sup>6</sup> du Général



En 1904 la tour Eiffel devient station TSF. La route passant devant la tour Eiffel sera baptisée quai Branly en 1941.

<sup>5</sup> Le lieutenant de Vaisseau Camille Tissot, de la Marine Nationale, utilisait les appareils de Ducretet et Popoff.

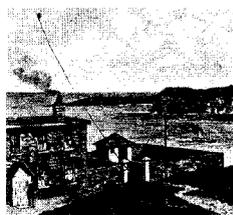
<sup>6</sup> Louis de Broglie a bien connu le général Ferrié qui était un ami de son frère Maurice et chez qui il part, en octobre 1913, faire son service militaire au service de radiotélégraphie des armées. Mais la guerre éclate et il restera mobilisé cinq ans. Au contact du grand spécialiste de la TSF naissante, il peut alors *suivre tous les progrès de la radiotélégraphie*. Cette époque lui fera dire plus tard : « *Quand on s'est sali les mains pendant des jours et des nuits... il n'est plus si facile de croire qu'une onde ne puisse être qu'une probabilité de présence.* »

Ferrié : « *Savant éminent, incomparable animateur, patriote éclairé, chef militaire plein d'autorité et de compétence, il était aussi un grand homme de devoir et ce trait s'ajoutant aux autres achève de faire de lui l'une des plus nobles figures que la France contemporaine ait produites* ».

## 12 décembre 1901, la première liaison TSF transatlantique

---

Marconi commence, en octobre 1900, à établir les plans de la station de Poldhu (en Cornouailles), qui sera la station d'émission transatlantique. En janvier 1901, une autre station, celle de Lizard, à 6 miles de Poldhu, devient opérationnelle. Cette station est destinée à l'aide au trafic de bateau mais sert également de station de test de réception. C'est là que le 23 janvier, Marconi établit un nouveau record de distance : une liaison de 300 km entre l'île de Wight et Lizard. Fleming est chargé, à Poldhu, de la conception et de la réalisation de la partie émettrice. Il installe, en avril 1901, la *Power House*, dont la puissance est cent fois supérieure à celle des installations antérieures. Un moteur de 32 chevaux entraîne un alternateur de 25 kW lequel alimente un transformateur (2000 V → 20000 V) destiné à l'alimentation d'un banc de condensateurs, qui ensuite se déchargent dans le circuit de l'éclateur. La construction des aériens débute en avril par l'installation d'un premier mât de 65 m de hauteur puis, en mai, par celle d'un second. Au mois d'août, la construction des 20 mâts disposés sur un cercle de 56 m de diamètre et portant les fils d'antenne en forme de cône inversé est terminée.



Première liaison TSF transatlantique (12 décembre 1901) : station de réception de Terre-Neuve.

Mais alors que tout semble aller pour le mieux, une tempête dévaste le dispositif le 17 septembre. Une semaine plus tard, une structure provisoire est de nouveau opérationnelle. En parallèle de la construction de Poldhu, Marconi s'embarque en mars pour les États-Unis où il cherche un site pour construire une station identique. Le choix se porte sur Cape Cod dans le Massachusetts. Pourtant, en octobre, les aériens de Cape Cod sont à leur tour dévastés par la tempête. Marconi, qui voulait d'emblée faire une liaison bidirectionnelle entre Poldhu et Cape Cod (pour une future utilisation commerciale) change alors de stratégie.

Il décide de faire un système plus simple. À Poldhu, l'aérien sera constitué de deux solides mâts espacés de 15 m et supportant des fils d'émission en forme d'éventail, l'antenne de réception sera constituée, quant à elle d'un simple fil métallique porté par cerf-volant ou ballon. Par ailleurs, Marconi décide de rapprocher le site de réception : il laisse provisoirement celui de Cap Code et s'installe à Terre-Neuve

(à l'époque, en colonie britannique) sur une hauteur de Saint-John, au lieu dit Signal Hill. Le 26 novembre, Marconi embarque pour Terre-Neuve sur le Sardinian et le 9 décembre, la station de réception de Terre-Neuve est prête. Il est convenu qu'à partir de ce moment là, Poldhu enverra des signaux (S en morse, soit : ●●●) chaque jour entre 11h30 et 14h30 (heure de Signal Hill)<sup>7</sup>. Finalement, le jeudi 12 décembre 1901 à 12h30, le premier signal (●●●) est reçu à Terre-Neuve après avoir traversé l'Atlantique sur 1800 miles (3500 km). Marconi raconte plus tard ce moment historique : « C'était un peu après midi (temps local), le 12 décembre 1901, que je plaçais un écouteur téléphonique à mon oreille et que je commençais à écouter. Le récepteur placé sur la table devant moi était vraiment très rudimentaire ; une petite bobine, un condensateur et un cohéreur, ni lampe, ni amplificateur, pas même un cristal. J'étais sur le point de soumettre mes convictions à l'expérience. 50 000 £ avaient été investies dans ce test pour obtenir un résultat qui était jugé impossible par quelques-uns des principaux savants de l'époque. La question clef était de savoir si les ondes seraient arrêtées par la courbure de la Terre. J'ai toujours été convaincu du contraire, mais quelques personnalités éminentes me disaient qu'une liaison transatlantique sans fil serait impossible à cause de cela. La réponse, première et définitive, vint à 12h30... »

Le 14 décembre, Marconi (il a alors 27 ans) fait l'annonce officielle de cette première. Les réactions vont de l'enthousiasme au scepticisme. Le *New York Times* titre : « Le plus merveilleux développement scientifique des temps modernes ». Graham Bell félicite Marconi (18 décembre), Elihu Thomson, au nom de l'*American Institute of Electrical Engineers* (l'actuelle IEEE), donne à New York, le 13 janvier 1902, une réception en l'honneur de Marconi, lequel prédit alors que l'on pourra transmettre un signal autour de la Terre instantanément (ce qui sera fait 24 ans plus tard). Dans son article du 12 avril 1902, *L'illustration*, il écrit : « De ce côté-ci de l'atlantique [en Amérique], une certaine réaction se produisit et on alla jusqu'à parler de bluff et de supercherie. Il faut reconnaître, en effet, sans pour cela révoquer en doute les affirmations d'un savant tel que M. Marconi, que la façon dont les expériences ont été conduites prête à de justes critiques. Au lieu de la seule lettre S, il eût été sans doute préférable d'expédier un mot entier convenu d'avance. Le choix même de cette lettre S n'était pas heureux, les trois brèves qui la composent pouvant être confondues avec les effets analogues que produisent dans les circuits télégraphiques les décharges d'électricité atmosphérique... »

Marconi entreprend alors de consolider ses installations, quatre tours de 70 m de haut, supportant les fils d'antenne sont achevés à l'automne

<sup>7</sup> Lors de cette transmission, la longueur d'onde choisie était de l'ordre de 2000 m.

1902, à Poldhu et en décembre de cette même année, une station identique (mais équipée d'un émetteur deux fois plus puissant) est achevée à Table Head, près de la ville de Glace Bay en Nouvelle-Écosse.

Dans la nuit du 16 décembre 1902, trois messages sont envoyés du Canada (Glace Bay) en Europe, le premier est destiné au Roi d'Italie, Victor Emmanuel, et est signé Marconi ; le second au Roi d'Angleterre Édouard VII, également signé Marconi ; et le troisième de nouveau à Édouard VII, mais signé du Gouverneur du Canada. Le 14 décembre, Marconi quitte Glace Bay pour Cape Cod, et le 18 janvier 1903, le premier message des États-Unis (Cap Code) vers l'Angleterre (Poldhu) est transmis. Il est adressé par le Président des États-Unis, Théodore Roosevelt, au Roi d'Angleterre Édouard VII : « *Prenant avantage du merveilleux triomphe de la recherche scientifique qui a réussi à perfectionner le système de télégraphie sans fil, je vous transmets, au nom du Peuple américain, mes plus cordiales salutations et mes bons vœux à vous et au Peuple de l'Empire Britannique* ». Finalement, c'est le 7 octobre 1907 que la première liaison transatlantique sans fil commerciale sera ouverte, entre Glace Bay et Clifden (Irlande).

Marconi poursuivra sans relâche ses travaux. En 1913, la société Marconi équipe 435 navires et 30 stations. En 1915, une première communication transpacifique, entre San Francisco et Funabashi au Japon, est établie. Marconi relie en 1918, l'Angleterre à l'Australie et donne en 1922, une démonstration du principe du radar. En 1932, il réussit la première liaison radio téléphonique entre le Vatican et la résidence d'été du Pape (à l'époque Pie XI) à Castel Gandolfo, soit une distance d'environ 25 km. La carrière de Marconi est jalonnée de prix et remplie d'honneurs de toutes sortes. Notons en particulier qu'il participe en 1919, à la Conférence de la Paix à Paris comme délégué plénipotentiaire et signe, à ce titre, les Traités de Paix avec l'Autriche et la Bulgarie. En 1929, il est fait marquis et est nommé au Sénat italien puis il est élu, en 1930, Président de l'Académie royale italienne. Il meurt le 20 juillet 1937 à Rome et est inhumé dans sa ville natale de Bologne.

### **Le cohéreur de Branly utilisé dans le premier radar<sup>8</sup>**

Christian Hülsmeyer peut être considéré à bon droit comme l'inventeur du radar. Hülsmeyer est un inventeur né. En 1902, il décide de créer son entreprise d'électricité. Il s'intéresse à la radio naissante et dépose le 5 novembre 1902, un brevet pour un appareil permettant de protéger une liaison radiotélégraphique de toutes interférences grâce à une synchronisation électromécanique de

<sup>8</sup> Pour plus d'informations, lire *Le radar, 1904-2004*, Yves Blanchard, Éd. Ellipses, 2004.

l'émetteur et du récepteur. Cherchant à se démarquer de Marconi, il prend, le 30 avril 1904, un nouveau brevet pour un système qu'il appelle le « Telemobiloskop ». Ce brevet peut être considéré comme l'acte fondateur du radar (radio detection and ranging). Le Telemobiloskop est un système anti-collision capable, à partir d'un bateau, de détecter la présence d'un autre bateau et de donner sa direction. Une démonstration a lieu le jeudi 9 juin 1904, dans le port de Rotterdam. Hülsmeier présente son invention de la façon suivante : « *Le Telemobiloskop est basé sur le principe de la Télégraphie Sans Fil, mais contrairement aux systèmes habituels, l'émetteur et le récepteur sont placés au même endroit, et isolés l'un de l'autre de façon à ce qu'ils ne peuvent pas communiquer par un signal direct. Le récepteur ne peut être atteint que par une onde électrique qui aurait été réfléchiée par un obstacle métallique. Il déclenche alors une alarme, qui est transmise à la passerelle et permet d'indiquer au capitaine d'un bateau, la direction et aussi la distance de tout autre bâtiment. Mon opinion est que ce dispositif permet de voir comme un œil électrique, aussi bien de nuit que dans le brouillard, jusqu'à une distance de 3 ½ miles...* »

Le dispositif d'Hülsmeier est constitué à l'émission, d'un émetteur à étincelles de Righi placé au foyer d'un miroir de façon à produire « un projecteur qui émet les ondes électriques sous la forme d'un faisceau cylindrique » et à la réception, d'un cohéreur de Branly. Le tout est monté dans un système qui ressemble étrangement aux radars actuels : une rotation panoramique sur 360° commandée par un moteur électrique permet de faire l'observation de veille. L'énergie est transmise par un système de balais collecteurs qui préfigurent les joints tournants qui sont aujourd'hui utilisés et la stabilisation vis-à-vis du tangage et du roulis est réalisée par une demi-sphère à cardans.

Malheureusement, une seconde campagne d'essais se solde par un échec et précipite la fin de l'aventure. En 1922, Marconi, dont on ne sait pas s'il avait eu connaissance des travaux de Hülsmeier écrit : « *Il me semble qu'il serait possible de concevoir un appareil, au moyen duquel un bateau rayonnerait ou projetterait un faisceau divergent de rayons dans une direction désirée. Ces rayons venant à rencontrer un objet métallique comme par exemple un autre bateau, seraient réfléchis jusqu'à un récepteur abrité de l'émetteur, et ainsi révéleraient instantanément la présence de ce bateau dans le brouillard ou le mauvais temps. L'avantage d'un tel dispositif serait de pouvoir avertir de la présence et du cap des autres bateaux, quand bien même ceux-ci seraient-ils dépourvus de tout équipement radio...* »

En 1935, trente ans après le brevet fondateur de Christian Hülsmeier, mais sans rien connaître du Telemobiloskop, les Français Maurice Ponte et Henri Gutton installeront sur le Normandie un système de détection d'obstacles qui est considéré comme le premier radar centimétrique de l'histoire.

# De la TSF à la radio

---

## *Du début du siècle à la première guerre mondiale*

Les lampes seront les instruments des futurs progrès de la TSF. En 1903, John Ambrose Fleming, qui était conseiller scientifique de la Société Marconi, invente la diode. L'américain Lee de Forest perfectionne la diode de Fleming en y ajoutant une électrode interne. La triode ainsi réalisée (en 1906) permet la détection, l'amplification des signaux faibles et l'auto oscillation ce qui conduira à la réalisation d'émetteurs à ondes entretenues. Tandis que Lee de Forest transmet pendant plusieurs soirées d'avril 1908 des émissions parlées et même musicales entre la tour Eiffel et Villejuif, la portée des signaux Morse transmis par TSF depuis la Tour Eiffel atteint cette même année 8000 km. De retour aux États-Unis, Lee de Forest transmet en janvier 1910, sur 20 km, depuis le Metropolitan Opera, un concert de Caruso.

En France, c'est le 12 mars 1910 précisément qu'est créée la SFR, Société Française Radio-électrique. L'adjectif « radio-électrique » a été adopté pour désigner à la fois ce qui se rapporte à la radiotélégraphie, la radiotéléphonie et la radiodiffusion. Il rappelle le terme radioconduction introduit à l'origine par Branly. Pendant la première guerre mondiale, la TSF est naturellement utilisée par la marine ainsi que par l'Armée de terre. Depuis 1915 en effet, la mise au point de petits récepteurs-émetteurs permet de maintenir le contact entre les unités de première ligne et les états-majors de l'arrière. Grâce à la TSF, on peut aussi, à partir de 1916, assurer des liaisons directes entre des avions d'observations (ou des zeppelins) et les états-majors ou les batteries d'artillerie. Toutes les armées alliées ont fait appel à la SFR : 63 stations fixes de plus de 5 kilowatts, 18 000 postes d'avion, 12 500 postes portatifs, 300 postes de navire, autant de postes mobiles pour véhicules ont été réalisés. À la fin de la guerre, le gouvernement français réorganise le secteur des radiocommunications. La Compagnie générale de télégraphie Sans Fil (CSF) est créée en 1919 et devient la société mère de la SFR.

À partir de 1910, la Tour Eiffel émet des signaux horaires qui permettent aux navires de déterminer leur longitude. L'année suivante, un nouveau service est mis en place : la transmission en Morse de bulletins météorologiques.

## **L'apport de Ferdinand Braun**

Ferdinand Braun naît à Fulda le 6 juin 1850. Après des études de physique à l'Université de Berlin, à cette époque la plus prestigieuse d'Europe, et plusieurs postes d'enseignement, il réalise sa première découverte en 1874 : l'effet redresseur du cristal de galène (PbS), effet qui sera à l'origine du développement des semi-conducteurs !

En 1883, il devient professeur à Karlsruhe, il est donc à ce poste le prédécesseur de Hertz. Après un séjour de dix ans à l'Université de Tübingen, Braun devient professeur à l'Université de Strasbourg en 1895. Il y restera jusqu'en 1914. C'est à Strasbourg qu'il invente en 1897, le tube cathodique dont les développements conduiront à la télévision (inventée par Zworykin en 1927). Mais, en 1897, il est contacté par des investisseurs pour étudier un système de télégraphie dans l'eau qui n'aura pas de suite, mais c'est par cette étude que Braun commence ses travaux en télégraphie sans fil.

Dès 1899, il améliore l'émetteur de Marconi en développant les circuits couplés à l'émission, son dispositif étant constitué de deux circuits. Le premier circuit – le primaire – contient un condensateur, une bobine et un éclateur permettant de créer une étincelle, le second circuit – appelé secondaire – est couplé par induction au premier par une bobine et contient une antenne placée en série et connectée à la terre. Ferdinand Braun comprend qu'en jouant sur la longueur d'onde d'émission, on peut augmenter la portée de l'émetteur. Grâce à ce dispositif, il atteint une portée de 35 km et en 1899, il réalise une communication dans la mer du Nord, à Cuxhafen, couvrant une distance de 62 km. En 1901, il publie une brochure intitulée : *Wireless telegraphy through water and air*. Par ailleurs, à partir de cette époque, en remplaçant dans son dispositif le cohéreur de Branly par un cristal de galène, il améliore également l'efficacité du récepteur. En 1902, Braun réalise une antenne directive et l'année suivante sa société Telebraun fusionne avec AEG pour devenir Telefunken. C'est à partir de 1906 qu'il réalise les premiers postes à galène. Grâce à ce type de détection, il sera possible de transmettre des sons, ainsi c'est en 1906 que sera établie la première liaison en téléphonie sans fil et que le premier concert par TSF sera diffusé.



Ferdinand Braun  
(1850-1918).

### *Les premières radios*

Le 26 novembre 1921, une chanteuse de l'opéra comique, Yvonne Brothier chante, dans les locaux de la récente et puissante station de Sainte-Assise, près de Melun, d'abord la Marseillaise, puis un air du Barbier de Séville. À 40 km de là, à Paris, se tient à l'hôtel Lutétia un banquet en l'honneur du centenaire des articles fondateurs d'électrodynamique d'Ampère. Les participants à ce banquet peuvent entendre « avec une grande intensité et une netteté parfaite » la voix de la chanteuse. Peu de temps après cette manifestation, une autre émission de radiodiffusion est faite à l'initiative de la CSF le 22 juin 1922. Émile Girardeau, patron de la CSF, invite ce jour là quatre mille personnes à un grand concert donné à l'auditorium du Trocadéro.

Mais lorsque les invités arrivent, ils ne voient aucun instrumentiste, mais seulement un technicien de la SFR qui leur explique que l'orchestre est à Levallois, fief de la SFR, et qu'ils vont donc assister à la première émission de radio. Les ingénieurs sont particulièrement ravis du succès de l'opération, car cela leur permet de devancer la BBC de très exactement huit jours. Le premier poste privé français, Radiola, est créé par la SFR et commence à émettre le 6 novembre 1922. Il diffuse des concerts, des lectures de poèmes et des bulletins d'information.

En 1924, la station prend le nom de « Radio Paris », on y diffuse le premier « journal parlé » au monde ainsi que des émissions, appelées « radio concerts », où l'on peut entendre des artistes comme Sacha Guitry ou Yvonne Printemps. À partir de 1923, les émetteurs de radiodiffusion se multiplient tant en France qu'à l'étranger : Lyon, Birmingham, Manchester, Moscou, Berlin, Bruxelles, Prague, Lausanne, Rome, Madrid, ... En 1925, des programmes réguliers existent dans 19 pays d'Europe, ainsi qu'aux États-Unis, au Japon, en Australie et en Argentine. Toutefois à cette époque, les postes récepteurs à lampes sont très coûteux et les amateurs de radio construisent souvent eux-mêmes leur poste à galène qui, grâce à un casque à écoute, permet d'entendre l'émetteur le plus proche. En France, on estime qu'en 1928, il y a environ 600 000 postes récepteurs. Dans une récente et excellente autobiographie (*Mémoires*), Alain Decaux écrit de façon très vivante (et vécue) la façon dont était utilisée en pratique la TSF. La scène décrite se passe probablement en 1930 :

*« J'assiste à un spectacle singulier : bon-papa et bonne-maman sont installés de part et d'autre de la table. Au milieu de la toile cirée est installé un appareil biscornu relié par un long fil au robinet de cuivre de la cuisine. S'y attachent des écouteurs que mes grands-parents placent, l'un et l'autre, sur leurs oreilles. Je les vois si attentifs, si tendus que je cherche autour de moi ce qui peut les préoccuper à ce point. Une exclamation de bonheur me fait sursauter :*

*- ça marche ! crie bon-papa.*

*Leurs visages s'illuminent en même temps. Ils écoutent donc la même chose, mais quoi ? Compatissante, bonne-maman ôte son casque et place l'un des écouteurs sur mon oreille. J'entends une sorte de grésillement. Ce son, commente à mon intention bon-papa, est déjà une victoire. Quand une voix nasillarde ou quelques notes de piano s'y substituent nous voici tous trois au comble de l'exaltation :*

*- ça marche ! ça marche !*

*Je viens de découvrir le poste à galène. Trois ou quatre ans plus tard, à Wattignies, je verrai apparaître – incomparable progrès – un poste à haut-parleur. »*

## La radio des années 30

C'est au début des années 30 que la TSF devient la radio, même si le terme TSF reste très cher aux français. Les premiers studios apparaissent. Ils sont situés en ville, les «speakers» y lisent les textes préparés par les journalistes. Les postes émetteurs, qui sont eux situés hors des villes, deviennent plus puissants ce qui permet d'adresser un plus grand nombre d'auditeurs. Le domaine se professionnalise, l'État intervient, des conférences internationales (la première a lieu à Prague en avril 1929) permettent de répartir les fréquences par zones géographiques. Les postes récepteurs sont à la fois plus performants et moins coûteux. La production se développe. Ainsi, aux États-Unis en 1933, 62 % des ventes de postes correspondent au remplacement de postes plus anciens. La publicité commence à apparaître sur les ondes. Les émissions évoluent, des genres nouveaux voient le jour.

Aux États-Unis, le 30 octobre 1938 (à la veille d'Halloween) l'émission sur *La guerre des mondes* est la première « radio réalité ». Bien qu'il s'agisse de l'adaptation radio du livre de science fiction, les reportages et les effets sonores peuvent faire croire à un vrai reportage. Une partie des auditeurs de New York croit à une invasion de la ville par les martiens et s'affole. Cela assure la notoriété de son jeune producteur, Orson Welles, qui n'a alors que 23 ans. Les hommes politiques prennent conscience de la puissance de ce nouveau moyen de communication. Aux États-Unis, le président Roosevelt utilise ce vecteur dès 1933, pour s'adresser à ses compatriotes lors de ses « Causerie au coin du feu ». En Allemagne, dès son installation comme chancelier du Reich, le 30 janvier 1933, Hitler fait de la radio un moyen de propagande. Ses discours sont radiodiffusés grâce à Goebbels, son ministre de la propagande, qui auparavant a soigneusement « épuré » la radio. Le même Goebbels, conscient de l'impact de ce « média », fera fabriquer des récepteurs bon marché, les Volksempfänger. Ce modèle permet en plus, de bien recevoir les postes allemands tout en rendant difficile la réception des émissions étrangères... En France, le président Doumergue peut toucher directement par ce moyen, à partir de 1934, la population, ce qui n'est guère du goût du parlement. Toujours en France, les élections de 1936 seront les premières à faire l'objet d'une campagne électorale radiodiffusée. Le nouveau président du Conseil, Léon Blum, fera connaître les décisions de son gouvernement par la radio. Les jeux olympiques de Berlin de 1936 constituent le premier exemple, à grande échelle, du rôle que peut jouer la radio sur les politiques étrangères : les jeux sont retransmis en 28 langues et participent à la diffusion de l'image de puissance que veut se donner le Reich.

Quelques chiffres permettront de mesurer le très fort développement de la radio dans les années 30. Aux États-Unis, le nombre de stations émettrices passe de 604 en 1932 à 650 en 1938, tandis que le nombre de postes récepteurs est presque quadruplé pendant la décennie (12 millions en 1930 et 50 millions en 1940). En 1940, on compte 15 millions de récepteurs radio en Allemagne, 10 millions en Angleterre et plus de 5 millions en France.

### *La radio pendant la seconde guerre mondiale*

En temps de guerre, la radio est soumise à la censure. Les habitants d'un pays belligérant chercheront donc à capter des émissions dans leur langue, mais issu d'un pays voisin. Cela a fait naître un nouveau risque : chaque état diffuse des informations dans la langue de ses ennemis en cherchant à ruiner le moral des populations. La radio, qui s'est considérablement développée depuis la fin de la grande Guerre, n'est donc plus seulement un moyen de communications entre forces militaires, elle joue un rôle à l'échelle nationale. Ainsi en mai-juin 1940, l'exode des français a été amplifiée par la radio. L'annonce radiodiffusée par le Maréchal Pétain de la demande d'armistice (le 17 juin 1940) accéléra la débâcle. Inversement, le cabinet Churchill rend possible le fameux appel du 18 juin du général de Gaulle, alors – de façon très éphémère – sous-secrétaire d'État du ministère de la Guerre de Paul Reynaud. Au total, le général s'adressera 67 fois aux français à partir du micro de la BBC. Un peu plus tard, c'est la radio qui a permis d'établir des contacts entre les résistants et les forces alliées. Aux États-Unis, l'*Office of War Information* est créée en juin 1942, il dispose d'un réseau de plus de 300 stations uniquement dédiées aux armées américaines.

### *La radio après la seconde guerre mondiale*

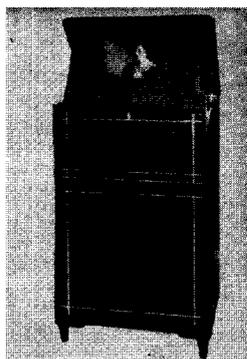
La modulation de fréquence, qui fait son apparition au début des années 40 aux États-Unis, ne prend véritablement son envol qu'après la seconde guerre (il y a en 1948 aux États-Unis 500 émetteurs en modulation de fréquence). Les récepteurs associés sont plus chers, mais permettent un meilleur confort d'écoute. L'apparition des magnétophones permet de faire des enregistrements ce qui assure une plus grande souplesse dans le fonctionnement des stations d'émission. La radio poursuit son développement : 26 millions de postes récepteurs sont fabriqués par an dans le monde (1953), dont la moitié aux États-Unis. Dans ce pays, dès 1950, la quasi-totalité de la population peut écouter la radio. En Europe, au Canada et au Japon, il faut attendre la fin des années 50 pour que la majorité de la population bénéficie de la radio.

# Naissance de la télévision

---

## *L'époque héroïque*

Après la radio, la télévision n'allait pas tarder à suivre. Son histoire est complexe et nous ne la développerons pas dans ce livre. Disons simplement que l'idée de transmettre des images à distance remonte au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle<sup>9</sup>. Ainsi, le pantélégraphe que Giovanni Caselli met au point en 1856, est utilisé par les Postes françaises pour transmettre de courts messages ou de simples dessins au trait à l'aide du télégraphe à fil. En 1907, l'allemand Arthur Kron réussit à transmettre une photographie par le télégraphe électrique entre Berlin et Paris. Eugène Belin perfectionne le procédé, son bélinographe permet de diffuser des photos d'actualité pour les journaux (à raison de 12 minutes pour une photo de 13 × 18). Mais il est une chose de transmettre une photo par câble en 12 minutes et cela est une autre que d'en transmettre 25 par seconde sans fil !



Récepteur de télévision cathodique avec miroir réfléchissant. Vers 1937.

Paul Nipkow développe en 1884 un procédé très ingénieux : un disque ayant de tout petits trous tourne, ce qui permet d'analyser l'image ligne à ligne. De son côté, le russe Boris Rosling réalise à partir de 1907, le premier tube cathodique (une variante de l'oscillographe cathodique inventé par Ferdinand Braun en 1897). Un élève de Rosling, Vladimir Zworykin met au point, en 1927, l'iconscope, ce qui permet d'améliorer à la fois les caméras d'enregistrement et les récepteurs électroniques à tube cathodique. Zworykin travaille pour RCA et cette compagnie ne tarde pas en 1931, à mettre un émetteur au sommet de l'Empire State Building. Mais le nombre de récepteur reste très faible : seulement 5000 aux États-Unis dix ans plus tard.

En France, notre compatriote Holweck réalise, en 1927, un premier récepteur télévision utilisant un tube cathodique dont la résolution (36 lignes) est suffisante pour apercevoir une figure humaine sur l'écran. La première démonstration publique de télévision est faite en France le 14 avril 1931. Le poste émetteur se trouve à Montrouge, dans le laboratoire de la Compagnie des Compteurs, et le récepteur à Malakoff, deux kilomètres plus loin, dans l'amphithéâtre de l'École Supérieure d'Électricité. René Barthélemy, directeur du laboratoire de Malakoff et responsable de cette grande première, nous en dépeint les circonstances : « *C'était au début de 1931. Pour ne pas trop reculer la date de*

---

<sup>9</sup> Le mot télévision apparaît pour la première fois en 1900, à l'occasion du congrès international d'électricité, qui s'est tenu du 18 au 25 août 1900, dans le cadre de l'Exposition universelle de Paris.

*l'expérience, je décidai de m'en tenir à l'analyse de trente lignes. Je disposais d'un matériel assez complet, un analyseur à tambour à miroirs, pour prises de vues directes, un télécinéma, et un récepteur sur écran, le premier ! En mars, mon collaborateur M. Strelkoff s'installa à Malakoff, dans les locaux de l'École Supérieure d'Électricité [...] Nous n'étions que quatre au total, pour assurer le fonctionnement, émission, réception et, en même temps, la conférence explicative à l'amphithéâtre [...] Enfin, la date fut fixée au 14 avril. Des demandes d'admission furent adressées par milliers [...] Un commissaire me demande d'ouvrir les portes de la salle, le hall est plein à craquer. Mon maître, P. Janet, est là, et M. Belin présidera... Sur les bancs prévus pour trois cents personnes, huit cents spectateurs s'écrasent, et le hall est toujours plein... Vingt heures trente-cinq : le haut parleur démarre. Les accents pathétiques de la Marche hongroise de Berlioz créent l'atmosphère ; on éteint. Le miracle se produit : sur l'écran, réfléchi par trois glaces, le « Paris » tracé à la craie sur le tableau du studio apparaîtrait, brillant à souhait. On « voit » le tableau disparaître et, à sa place, venir M. Lamblot qui annonce : Messieurs, les réglages sont terminés, dans quelques minutes vous verrez nos artistes. Des applaudissements crépitent [...] une démonstration de télégramme instantané succède, puis enfin, le film... » À partir de décembre 1932, Barthélemy, depuis l'émetteur installé rue de Grenelle à l'École Supérieure d'Électricité, réalise un programme expérimental d'une heure par semaine.*



René Barthélemy  
(1889-1954).

Les premiers programmes réguliers de télévision apparaissent aux États-Unis, à partir de 1933, tandis qu'en France la télévision publique date de 1935. L'inauguration officielle est faite le 26 avril au 103 rue de Grenelle. L'émetteur permet de transmettre dans un rayon de 100 km autour de Paris. Alors qu'en 1936 on ne compte que 2000 récepteurs dans le monde, les émissions régulières s'organisent au tout début de l'année 1937 dans des créneaux horaires pour le moins limités : de 11h à 11h30 et de 20h à 20h30 en semaine, et de 17h30 à 19h30 le dimanche ! Au printemps 1939, la tour Eiffel émet, depuis la rue de Grenelle, quinze heures de programme par semaine, mais les récepteurs sont rares (quelques centaines), le plus souvent placés dans des lieux publics.

En 1936, les jeux olympiques de Berlin sont télévisés en direct et retransmis dans les lieux publics d'une demi-douzaine de grandes villes allemandes.

## *L'après-guerre*

En 1945, on ne compte aux États-Unis qu'une demi-douzaine de stations et environ 10 000 récepteurs. L'utilisation des ondes métriques (VHF) puis décimétriques (UHF), en multipliant les canaux nécessaires, allait changer la donne : on dénombre 157 000 récepteurs en 1947 et quatre millions en 1950. La présence de la publicité devient omniprésente, jusqu'à 20 % du temps en période de grande écoute

(*prime time*). Déjà les indices d'écoutes (rating) déterminaient le maintien ou la disparition des émissions et condamnaient les stations à diffuser des programmes susceptibles d'optimiser le nombre de téléspectateurs.

En France, en octobre 1947, la programmation devient régulière (12 heures d'émission par semaine), le standard de l'époque est de 441 lignes. On peut assister en France, le 25 juillet 1948, pour la première fois en direct à la télévision, à l'arrivée du tour de France et suivre le 24 décembre, la messe de minuit à Notre-Dame de Paris. L'année suivante, deux speakerines sont recrutées : Jacqueline Joubert et Arlette Accart, tandis que Pierre Sabbagh présente le premier journal télévisé. C'est également l'époque de *La piste aux étoiles* de G. Margaritis, de *36 Chandelles* de Jean Nohain, etc.

En 1951, aux États-Unis, la première émission publique de télévision en couleur est diffusée par CBS à New York. Dès 1953 (34 heures d'émission par semaine), on peut assister à la première transmission en Eurovision. Le couronnement de la reine d'Angleterre est retransmis simultanément dans huit pays européens. La couverture est encore très limitée : le premier émetteur de province n'est installé à Lille que le 7 avril 1951, et le poste de Strasbourg n'est ouvert qu'en 1953. À cette époque, il existe 260 000 récepteurs en France (la plupart publics) et seulement 10 % des français peuvent recevoir la télévision.

### **Télévision couleur : NTSC, SECAM ou PAL ?**

La décomposition de la lumière blanche en trois couleurs fondamentales permet, en principe, l'accès à la télévision en couleur. Une des premières tentatives faite dans ce sens date de l'anglais Baird en 1927. Après de nombreuses tentatives, le NTSC (National Television System Committee) est adopté aux États-Unis et utilisé par RCA dès 1953. Le Canada (en 1956) puis le Japon (en 1960) adopteront également ce système. En France, les recherches conduites par Henri de France, de la Compagnie française de télévision, aboutissent en 1959 à la mise au point du procédé SECAM (Séquentiel Couleur à Mémoire), plus complexe mais de meilleure qualité que le NTSC. Le 29 avril 1960, une transmission couleur a lieu entre Paris et Londres. Mais peu de temps après, une version améliorée du NTSC apparaît en Allemagne, il s'agit du procédé PAL (Phase Alternative Line). Les deux procédés, SECAM et PAL ont été rendus compatibles de façon à pouvoir échanger des programmes en couleur.

En 1960, la télévision connaît une bonne diffusion : 35 millions de récepteurs aux États-Unis, 2 millions en France, etc. Au total, il n'y a pas loin de 90 millions de récepteurs dans le monde. Pratiquement seuls les pays d'Afrique ne possèdent pas encore d'émetteurs (apparition en 1960 en Egypte, en 1962 au Maroc, en 1963 au Gabon et au Congo, en 1965 en Tunisie et au Sénégal, en 1966 au Zaïre). En France, la deuxième chaîne fait son apparition le 18 avril 1964 et la troisième, le 1<sup>er</sup> janvier 1973. L'ORTF (Office de Radio-Télévision Française), créé en juin 1964, est démantelé le 1<sup>er</sup> janvier 1975 et quatre sociétés de programme sont créées : Télévision Française 1 (TF1) ; Antenne 2 (A2), France-Régions 3 (FR3) ; Radio-France, auxquelles il faut ajouter trois sociétés de services : Télédiffusion de France (TDF) ; l'Institut National de l'Audiovisuel (INA) et la Société Française de Production (SFP).

### *La télévision par satellite*

Au début des années 60, la télévision se mondialise avec l'avènement de la communication par satellite. On se souvient de la première transmission transatlantique, très médiatisée, qui a eu lieu en 1962 grâce au satellite Telstar. Mais la puissance émise par le satellite exigeait d'énormes antennes de réception, celle de Pleumeur-Bodou en Bretagne est restée justement célèbre. Compte tenu de la taille de ces antennes de réception, il n'est pas question de recevoir directement l'émission sur son poste ! Il s'agissait de liaisons point à point (ici, Telstar – Pleumeur-Bodou) qui étaient ensuite retransmis par des émetteurs hertziens classiques. L'étape suivante date des années 1970-1980. Un satellite peut alors couvrir une zone plus vaste et être reçu par plusieurs réseaux de câble, lesquels rediffusent les émissions vers les particuliers. La liaison satellite-usager n'était pas encore possible dans la mesure où elle exigeait des antennes réceptrices de plusieurs mètres de diamètre. La puissance embarquée par les satellites augmentant, des antennes de réception plus compactes devenaient suffisantes (quelques décimètres de diamètre), les programmes transmis se multipliaient et la télévision reçue directement depuis des émetteurs embarqués dans l'espace s'est rapidement développée. Cette facilité à diffuser directement chez l'utilisateur des programmes en provenance de satellites variés n'était, naturellement pas du goût des pays totalitaires, qui ont été obligés de mettre en place de coûteux systèmes de contre-mesure.

### *La télévision par câble*

Curieusement, la télévision par câble a une longue histoire. Dans certaines régions, le relief empêche de recevoir directement le signal de

façon directe. Dans ce cas, on plaçait une grande antenne captant le signal hertzien, celui-ci étant alors rediffusé par des câbles coaxiaux vers les abonnés. Un tel système a commencé à se développer aux États-Unis, dans les années 1949-1950. Ces antennes collectives, reliées à des câbles coaxiaux permettaient de diffuser une demi-douzaine de programmes. L'utilisation de fibres optiques (à la place des câbles coaxiaux) a permis d'augmenter considérablement le nombre de chaînes (jusqu'à une cinquantaine). Cette méthode de transmission prend vite le dessus dans un certain nombre de pays (en 1991, 90 % des foyers étaient reliés en Belgique, 60 % aux États-Unis, 40 % en Allemagne, ...) tandis qu'en France, moins de 1 % des foyers, à cette époque, était câblés (en revanche, 20 % étaient équipés d'antennes paraboliques).

De la même façon que l'apparition des magnétophones à la fin des années 40 a permis de faire des enregistrements radio et donc d'introduire une plus grande souplesse dans le fonctionnement des stations d'émission, l'apparition des magnétoscopes (inventés par la société AMPEX, en 1956) a facilité le travail des studios de télévisions, grâce à la possibilité offerte par le différé. Le magnétoscope s'est ensuite démocratisé et a trouvé un usage domestique à partir du début des années 70.

### *La télévision haute définition*

Une meilleure résolution de l'image a été un souci constant dans le développement de la télévision. On se souvient du premier récepteur télévision que Holweck réalise en 1927, en utilisant un tube cathodique dont la résolution n'est que de 36 lignes, ce qui permet juste d'apercevoir une figure humaine sur un écran. On passe assez rapidement à 60, 90 et 180 lignes. En 1936, la BBC atteint 240 lignes avec une cadence de 25 images par seconde. En 1936, la même BBC lance un autre programme à 405 lignes. Une évolution semblable se produit aux États-Unis sous l'influence de la FCC (*Federal Communications Commission*) : 240 lignes en 1933 ; 343 en 1935 ; 441 en 1939 et 525 en 1941. Tandis que l'Angleterre reste à 405 lignes et les États-Unis à 525, la France (sous l'impulsion d'Henri de France) rêve d'un 1000 lignes, mais se fixe sur 819, alors que les autres pays européens adoptent le 625 lignes qui allait devenir un standard mondial. À la fin des années 80, une bataille mondiale a été livrée au sujet de la Télévision Haute Définition (TVHD). L'objectif était de transmettre des images au format 16/9 avec 1125 ou 1250 lignes, permettant de rendre une finesse comparable à celle d'une pellicule cinéma. La tendance est au

1250 lignes (deux fois 625 lignes). La TVHD permet une image beaucoup plus riche que la TV standard puisqu'elle possède cinq fois plus de points par image. Par ailleurs, le son est équivalent à celui d'un DVD ou à celui entendu dans une salle de cinéma.

Actuellement, le standard le plus courant, dit SDTV, est au format 4/3 et possède en Europe, 720 colonnes par 576 lignes avec une cadence de 25 images par seconde (ce qui est lié au 50 Hz). Aux États-Unis, il y a 720 colonnes par 438 lignes pour une cadence de 30 images par seconde (ce qui est lié au 60 Hz). La TVHD est au format 16/9. Elle possède soit 720 colonnes non entrelacées, soit 720p (p pour progressif), soit 1080 colonnes entrelacées : 1080i (i pour interlaced) et dans chaque cas, 1250 lignes. La TVHD peut également être diffusée sous le format 1080 × 1920, les récepteurs les plus récents permettant ce mode d'affichage.

La TVHD a été lancée aux États-Unis dès 1998, d'abord par le satellite, puis par la Télévision Numérique Terrestre (TNT). Les réseaux câblés ont emboîtés le pas, de sorte que près de 70 % des programmes de début de soirée (essentiellement films et événements sportifs) sont compatibles TVHD. En Asie, la Corée du sud (depuis 2001) puis le Japon (depuis 2003) diffusent également de nombreux programmes en TVHD. Le Japon prévoit d'ailleurs de cesser la diffusion en norme analogique dès 2007. En Australie, cinq chaînes diffusent des programmes en TVHD depuis 2001 et l'on note une croissance d'intérêt du public depuis la fin 2003. L'Europe n'est de ce point de vue pas très en avance. La première chaîne à avoir émis entièrement en TVHD est la chaîne belge HD-1 (*via* le satellite Astra).

### La télévision en relief

De nos jours, on parle plutôt de 3D TV (télévision 3 dimensions). La technique utilise d'une part, un écran « lenticulaire » d'autre part, un traitement de signal adapté. L'avantage de cette solution est double : il n'y a pas besoin de porter des lunettes stéréoscopiques pour voir en trois dimensions, de plus le champ de vision est assez large pour permettre à plusieurs téléspectateurs de regarder simultanément le programme (*multiview*). Par ailleurs, dans certains cas (texte par exemple), le mode 2D est préférable et c'est pourquoi le changement de mode (*switch*) 3D → 2D est rendu possible.

Le réseau ADSL standard (8 Mbits/s) et l'encodage (système de compression) MPEG-2 (3,5 Mbits/s) permettent de transmettre la télévision numérique « standard » tout en offrant un service de kiosque de vidéos à la demande (VOD). Le passage à l'ADSL 2+ (16 Mbits/s) et le MPEG-4 (10 Mbits/s) permettent de transmettre la télévision numérique haute définition ainsi que le service de kiosque de vidéos à la demande de même qualité.

## Le développement de la radio et de la télévision

Nous donnons ici, à titre indicatif, le nombre de récepteurs radio et de récepteurs télévision pour 1000 habitants (et non pas par foyer) dans différentes parties du monde en 2005 :

	Dans le monde	En Amérique du nord	En Europe	En Asie	En Afrique	Pays moins développés
Radio	450	1300	800	280	250	120
Télévision	240	450	520	230	90	40

Il est intéressant de comparer le développement des différents média pour deux classes de pays ; les plus développés d'une part, les moins développés, d'autre part (toujours pour 1000 habitants) :

	Journaux				Radio				Télévision			
	Années											
	70	80	90	00	70	80	90	00	70	80	90	00
Pays les plus développés	292	363	340	226	643	880	987	1061	263	424	492	548
Pays les moins développés	29	37	42	60	90	120	220	245	10	27	124	157

On constate donc qu'il y a un infléchissement dans le nombre de journaux vendus par habitant dans les pays développés à partir du milieu des années 1980, tandis que le nombre de journaux vendus dans les pays en voie de développement continue sa progression. En revanche, dans les pays développés comme dans ceux en voie de développement, le nombre de récepteurs radio et de télévision ne cesse d'augmenter, avec dans les deux cas une croissance plus rapide pour la télévision.

## Le phénomène internet

L'évolution très rapide d'internet, tant quantitativement que qualitativement, est de nature à bouleverser ce paysage. En effet, on trouve sur internet non seulement des informations écrites (y compris revues et livres, éventuellement payants), mais également la radio en ligne (il est ainsi possible d'écouter une station locale tout en étant à l'autre bout du monde), et même, avec l'apparition du haut débit et des moyens de compression d'image, la télévision. De la même façon, il est intéressant de comparer le taux de pénétration d'Internet pour

1000 habitants (et non pas par foyer) dans différentes parties du monde en 2005 :

- Dans le monde : 14,6 %
- En Amérique du nord : 68 %
- En Europe : 36,8 %
- En Asie : 8,9 %
- En Afrique : 1,8 %

## *Téléphone fixe et téléphone mobile*

Le développement du téléphone est extrêmement dispersé :

- En Afrique, il varie de 20 lignes pour 100 habitants dans les régions les plus développées (Seychelle, île Maurice) à moins de 0,2 ligne pour 100 habitants dans les régions les moins développées (République démocratique du Congo, Tchad, Niger).
- En Asie, il varie de 50 lignes pour 100 habitants, dans les régions les plus développées (Japon, Taïwan, Honk Kong) à moins de 1 ligne pour 100 habitants, dans les régions les moins développées (Cambodge, Bangladesh, etc.).
- En Amérique centrale, il est de 5 lignes pour 100 habitants (Haiti, Nicaragua, etc.), tandis qu'il atteint 60 % aux États-Unis et au Canada.
- En Europe, on compte environ 40 lignes téléphoniques pour 100 habitants.

Le développement de la téléphonie mobile est extrêmement rapide. À l'heure où les opérateurs lancent les premiers réseaux de 3<sup>e</sup> génération – 3G – (UMTS : *Universal Mobile Telecommunications System*), certains travaillent déjà sur le 4G. Le débit du 3G permet d'accéder au téléchargement de musique ou de vidéo. Il est possible également de faire des visioconférences et de regarder la télévision. Le téléphone mobile devient donc un véritable vecteur multimédia intégrant téléphone (naturellement !), radio, télévision, accès internet, jeux vidéo, plus une quantité de mémoire impressionnante capable d'enregistrer votre carnet d'adresse, votre planning, les itinéraires pour vos déplacements, le tout avec un système de localisation. Les premiers essais de téléphone 4G ont permis de transmettre des données au débit époustouflant de 1 gigabit par seconde. Vidéo haute définition, accès en temps réel à des contenus multimédia, etc. sont autant de possibilités offertes par ce type de système.

Le **Wi-Fi** (*Wireless Fidelity*) permet de créer des réseaux locaux (**LAN** : *Local Area Network*) sans fils à haut débit et ainsi, de relier des

ordinateurs portables, des assistants personnels (PDA) ou tous types de périphériques (imprimantes ou autres) sur un rayon de plusieurs dizaines de mètres en intérieur ou de plusieurs centaines de mètres en extérieur. Les opérateurs commencent à irriguer des zones à fortes concentration d'utilisateurs (gares, aéroports, trains, hôtels, ...) avec des réseaux sans fils, ces zones d'accès étant baptisées « *hot spots* ». De la même façon, la technologie **Bluetooth** (ou **WPAN** : *Wireless Personal Area Network*) est une technologie de réseau personnel sans fil de faible portée (quelques dizaines de mètres) permettant de relier sans fils les divers périphériques (PC, imprimante, clavier, souris, téléphone portable, oreillettes, appareils domestiques, etc.) entre eux.

### *Un complément précieux : le « smart dust »*

Le sans fil permet de relier des capteurs à un réseau de communication. Mais la miniaturisation des capteurs est telle que l'on parle aujourd'hui de poussière intelligente (*smart dust*). Ces poussières, de la taille d'un grain de sable sont de véritables objets communicants. D'ici quelques années, grâce aux micro et nanotechnologies, chacun de ces grains de poussière intelligents aura la puissance d'un PC ! Dès maintenant, dans un volume de quelques centimètres cube, on peut réaliser des capteurs de toutes sortes (température, humidité, pression, intensité lumineuse, vibrations, champ magnétique, etc.) intégrant une radio bidirectionnelle d'une portée d'une vingtaine de mètres, un microprocesseur, etc. Un exemple d'application (parmi de nombreux autres) est la détection de feu de forêt. En lançant un grand nombre de ces poussières intelligentes sur une forêt, elles pourraient communiquer de proche en proche et donner l'alerte en cas d'incendie. D'autres objets sont en cours d'étude. Citons-en deux exemples. Le premier est un microdrône, objet volant de la taille d'une abeille, pouvant emporter une micro caméra et transmettre des images à distance. Le second est une sorte de micro sous-marin qui pourrait, dans un avenir proche, pénétrer dans les vaisseaux sanguins pour tuer des microbes, corriger des erreurs génétiques, supprimer des cellules cancéreuses, réparer des tissus, tout en communiquant avec l'extérieur.

# 5

## Les ondes électromagnétiques aux XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècles : une large gamme d'utilisation

---

### Les différentes bandes radio

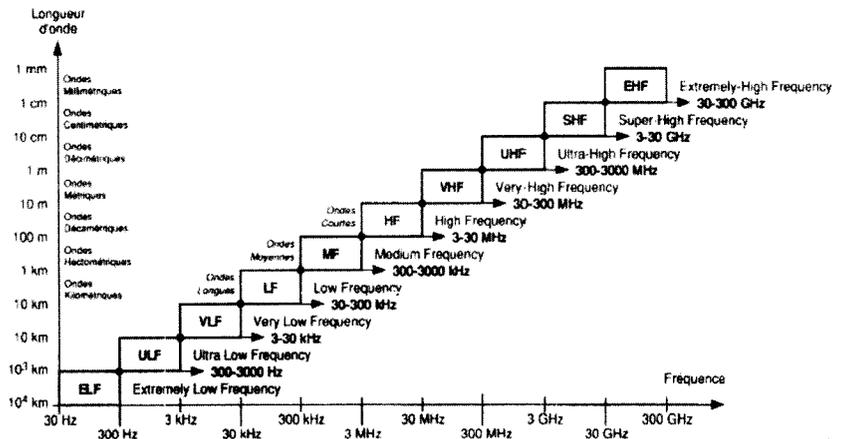
---

#### *Présentation*

Le spectre électromagnétique est extrêmement vaste, et même si l'on s'en tient aux ondes électromagnétiques elles-mêmes, il couvre au moins dix décades en fréquence (de 30 Hz à 300 GHz). Par commodité, ce spectre est « découpé » par décade en fréquence, de l'ELF (*Extremely Low Frequency*), couvrant la bande allant de 30 Hz à 300 Hz, jusqu'à l'EHF (*Extremely High Frequency*), couvrant la bande allant de 30 GHz à 300 GHz. La figure page suivante présente de façon synthétique ce « fractionnement ». En fait, le choix de la plus basse fréquence, comme celui de la plus haute fréquence, est largement arbitraire. D'une part, certains

considèrent une bande allant de 3 à 30 Hz (mais les applications, si elles existent, doivent être extrêmement rares). D'autre part, la partie au-delà de 300 GHz fait l'objet d'intenses recherches (voir le paragraphe sur *les ondes THz*). Au-delà encore, se trouve la région qui correspond à ce que l'on appelle l'optique (voir le paragraphe sur *les ondes optiques*), puis ce que l'on pourrait appeler les « rayonnements particuliers » (rayons X et gamma). Néanmoins, dans cette dernière partie, l'aspect corpusculaire l'emporte sur l'aspect ondulatoire (voir le paragraphe sur *les ondes « particulières »*). Nous allons, pour l'instant, nous limiter aux ondes purement électromagnétiques en indiquant, pour chacune des bandes du spectre, les principales particularités et les principales utilisations.

## Spectre électromagnétique radio et radar.



### La bande ELF (Extremely Low Frequency)

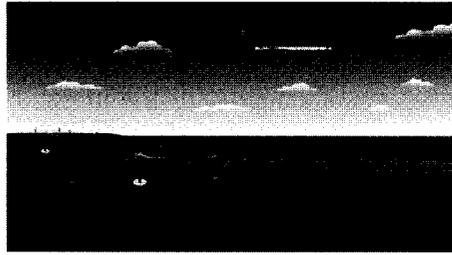
La bande ELF couvre la région spectrale allant de 30 Hz à 300 Hz, soit en longueur d'onde, de 1000 km (correspondant à 300 Hz) à 10 000 km (correspondant à 30 Hz). Sachant qu'une antenne n'est optimisée que lorsque sa hauteur est voisine d'une demie longueur d'onde (voir encadré), on comprend que la réalisation de l'émetteur n'est pas chose simple ! D'autre part, le débit d'information est d'autant plus élevé que la fréquence est grande (voir encadré). Aussi, on devine que les fréquences « extrêmement » faibles des ondes ELF n'iront pas non plus en leur faveur ! Alors, pourquoi s'intéresser aux ondes ELF ? La réponse est que ces ondes très basses fréquences présentent, par rapport aux autres ondes, l'immense avantage de pouvoir se propager (un peu) sous l'eau. Elles ont donc été développées pour assurer des liaisons avec les sous-marins (essentiellement nucléaires, ceux de la force de frappe). L'eau de mer étant bon conducteur de l'électricité, elle agit

comme un bon réflecteur pour les ondes. C'est un avantage si l'on considère l'aspect discrétion (les sous-marins sont indétectables depuis la surface de la mer, ou au-dessus), mais c'est un inconvénient si l'on prend en compte le nécessaire besoin de communiquer avec eux (afin de leur transmettre des ordres). Toutefois, plus la fréquence de l'onde est basse, meilleure est sa propagation dans l'eau. Naturellement, cette transmission dépend non seulement de la fréquence mais également de la salinité de l'eau. Toutefois, admettons que les ondes ELF peuvent se propager au-delà d'une centaine de mètres sous l'eau de mer. Ainsi, grâce aux ondes ELF, les plus hautes autorités gouvernementales peuvent communiquer avec leurs sous-marins. Communiquer est d'ailleurs un bien grand mot, lorsque l'on sait qu'en pratique, le débit est inférieur à 1 bit par seconde, mais il ne s'agit au fond que de transmettre deux à trois caractères codés. Pour recevoir le message, le sous-marin doit lui-même être muni d'une antenne de réception qui, en pratique, est constituée d'un long câble remorqué à bord. Par ailleurs, le signal est à sens unique. Pas question pour le sous-marin de transmettre une réponse, d'une part, parce que le dispositif d'émission requis serait prohibitif, d'autre part, car l'émission d'un tel signal permettrait aux ennemis de localiser sa position.

L'ampleur d'un dispositif d'émission ELF peut être appréhendée par une description succincte du site de transmission US. Il est constitué de deux transmetteurs (distants d'environ 230 km), l'un se trouvant dans l'état du Wisconsin, l'autre dans l'état du Michigan. Pour obtenir une couverture mondiale, les deux émetteurs doivent être reliés entre eux, ce qui est fait par un câble enterré de 260 km de long. L'antenne du Wisconsin est constituée de deux lignes, chacune ayant une longueur de 22 km. Quant à celle du Michigan, elle comporte trois lignes (deux de 22 km et la troisième de 44 km). Ces lignes sont aériennes, supportées par des pylônes, comme le sont les lignes de distribution de courant. Compte tenu de la très grande différence entre la longueur de l'antenne et la longueur d'onde générée, le rendement est très faible. Pour ne pas le dégrader encore plus, les lignes sont construites au-dessus d'une zone où se trouvent des roches précambriennes très peu conductrices (une « terre » conductrice ferait un shunt<sup>1</sup> et dégraderait le rendement). Un bâtiment de transmission est situé près de chacune de ces antennes. La fréquence délivrée par ce dispositif est de 76 Hz (ce qui correspond à une longueur d'onde un peu supérieure à 3900 km), et la puissance totale de l'émetteur est de 5 MW. Notons que l'ex-URSS avait développé également une station d'émission ELF, à une fréquence voisine (82 Hz).

---

<sup>1</sup> C'est-à-dire une dérivation électrique.



## Propagation ELF et ionosphère

En 1952, un allemand, du nom de Schuman a remarqué l'existence d'une cavité entre la terre et l'ionosphère présentant une fréquence fondamentale de résonance de 7 Hz. Une onde de cette fréquence peut alors se propager dans ce guide tout autour de la terre. Plus tard, d'autres physiciens ont constaté d'autres fréquences de résonance jusqu'à 100 Hz. C'est ce phénomène qui est utilisé pour réaliser des communications ELF à longue distance vers les sous-marins. La propagation dans ce canal, présente de plus, l'avantage de bénéficier d'une bonne transmission et d'être très stable.

L'ionosphère est un plasma (c'est-à-dire qu'une densité relativement importante d'électrons libres s'y trouve). Cela lui confère certaines propriétés « métalliques », comme la conductivité électrique et le pouvoir de réfléchir les ondes basses fréquences (typiquement inférieures à 30 MHz). Elle est constituée de plusieurs couches. La couche D dont la partie inférieure est située à 60 km d'altitude. La couche E dont la partie inférieure se trouve à 120 km d'altitude et la couche F dont la partie inférieure est localisée à 180 km d'altitude. La densité électronique de l'ionosphère varie suivant de nombreux paramètres comme l'effet jour/nuit et l'activité solaire. Cela explique que suivant l'heure, la position géographique et les conditions « magnétosphériques », les transmissions HF sont très variables.

### *La bande ULF (Ultra Low Frequency)*

La bande ULF couvre la région spectrale allant de 300 Hz à 3 kHz, soit en longueur d'onde, de 100 km (correspondant à 3 kHz) à 1000 km (correspondant à 300 Hz). Les deux applications les plus importantes des ULF sont, d'une part, l'étude des propriétés magnétosphériques, d'autre part, la détection des tremblements de terre.

L'interaction du vent solaire avec la magnétosphère peut conduire à la création d'orages magnétiques et à des instabilités de la partie basse

de celle-ci. Les ondes basses fréquences qui en résultent peuvent se propager sur de longues distances et leur détection nous renseigne sur l'état de la magnétosphère.

La magnétosphère est une région de l'espace dominée par l'interaction entre le vent solaire (plasma d'électrons et de protons émis par l'« évaporation » du Soleil) et le champ géomagnétique (c'est-à-dire la superposition du champ magnétique terrestre et du champ magnétique résultant des courants qui circulent dans l'ionosphère et la magnétosphère). Des phénomènes dynamiques, liés aux éruptions solaires, engendrent des « orages magnétiques ». Les manifestations les plus spectaculaires de ces orages, sont les aurores boréales (qui dans ce cas, peuvent être observées en France, en Floride ou au Mexique !) ainsi que des perturbations « radio-électriques ». Ainsi, lors de l'orage magnétique du 13 mars 1989, six millions de québécois ont été privés d'électricité pendant neuf heures par suite de l'interaction des ondes basses fréquences sur les lignes de transport d'électricité. Les conséquences de ces orages magnétiques sont telles, aussi bien pour les activités terrestres que spatiales, qu'ils font maintenant l'objet d'une détection systématique, c'est l'un des objets de la « météo magnétosphérique »<sup>2</sup>.

Les microfractures qui précèdent l'apparition des tremblements de terre sont à l'origine de la création d'ondes électromagnétiques. Les ondes ULF se propageant bien à travers la terre et sur sa surface. Leurs détections peuvent servir à prévenir les tremblements de terre de fortes magnitudes (typiquement supérieures à 6,5 sur l'échelle de Richter). Ces circonstances sont à l'origine d'un grand nombre d'études actuelles sur les mécanismes de création et de propagation des ondes ULF.

### *La bande VLF (Very Low Frequency)*

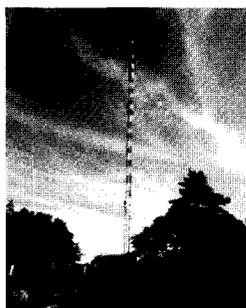
La bande VLF couvre la région spectrale allant de 3 à 30 kHz, soit en longueur d'onde, de 10 km (correspondant à 30 kHz) à 100 km (correspondant à 3 kHz). Les fréquences étant toujours très faibles, on ne peut transmettre que des messages très simples. Les ondes VLF sont utilisées en radionavigation. Ainsi, l'une des applications a été la distribution de l'heure pour la détermination de la longitude en mer. Par exemple, aux États-Unis, la station dite WWVL a transmis, entre

<sup>2</sup> Pour en savoir plus, voir par exemple : *L'environnement spatial*, Jean-Claude Boudenot, Éd. PUF, collection « Que sais-je ? », N° 3032 (1996).

août 1963 et juillet 1972, un signal à 20 kHz destiné à cet effet. Comme les ondes ULF, les ondes VLF peuvent également permettre d'étudier les phénomènes magnétosphériques ainsi que les phénomènes électromagnétiques liés aux orages. On dispose alors d'une large zone de couverture. Plusieurs stations en Antarctique jouent ce rôle. Enfin, les ondes VLF sont encore suffisamment basse fréquence pour pouvoir se propager un peu dans l'eau de mer (sur une profondeur allant de 10 à 40 m, suivant la fréquence de l'onde et la salinité de l'eau). On peut donc les utiliser pour transmettre des informations aux sous-marins lorsque ceux-ci ne sont pas trop éloignés de la surface. Pour ces raisons, une cinquantaine de stations d'émission VLF sont (ou ont été) réparties dans le monde. En France, deux stations existent, celle de Saint-Assise et celle de Rosnay. Nous avons déjà rencontré la Station de Saint-Assise (qui se trouve près de Melun) au chapitre 4. C'est grâce à elle qu'a pu être transmis en 1921, jusqu'à Paris, le récital de la chanteuse Yvonne Brothier. Entre 1950 et 1953, cette station s'est dotée d'un émetteur fonctionnant à 20 kHz (soit une longueur d'onde de 15 km) : l'antenne principale, couvrant une superficie de 64 hectares, était constituée par quatre pyramides renversées à base carrée de 400 m de côté. De nos jours, grâce à une antenne supportée par 10 pylônes de 250 m, elle permet d'assurer la liaison avec les sous-marins de la Force Océanique Stratégique. Une autre station, située à Rosnay, permet également ce type de liaison.

### *La bande LF (Low Frequency)*

La bande LF couvre la région spectrale allant de 30 kHz à 300 kHz, soit en longueur d'onde, de 1 km (correspondant à 300 kHz) à 10 km (correspondant à 30 kHz). De ce fait, on parle également « d'ondes kilométriques ». La fréquence est maintenant suffisamment importante pour transmettre un message radiophonique. Ces ondes se propagent principalement à très basse altitude. On parle d'ondes de sol (voir encadré sur les différents modes de propagation). De plus, leur grande longueur d'onde leur permet le contournement des obstacles. Ainsi, pour une même distance de l'émetteur, le niveau du signal reçu est très stable. En France, la radio la plus connue qui émet dans cette bande est France Inter (longueur d'onde de 1852 m, soit une fréquence de 162 kHz). Il faut noter que pour couvrir au mieux le territoire français, l'antenne de France Inter est située à Allouis (dans le Cher), commune proche du centre géographique de la France. Mais, France Inter peut également être captée par des auditeurs se trouvant en Belgique, en Allemagne, en Italie, en Espagne, en Angleterre ainsi qu'en Afrique du Nord (Maghreb). RTL émet également en LF (longueur d'onde de 1282 m, soit une fréquence de 234 kHz). Pour couvrir une zone vaste



Antenne d'Allouis.

(la portée est typiquement de 1000 km), la puissance des émetteurs est très grande, souvent plusieurs mégawatts. Comme pour la VLF, cette bande de fréquence est également utilisée pour la diffusion des signaux horaires.

C'est bien avant la seconde guerre mondiale, dans le cadre du plan Ferrié, qu'est prévue une installation grandes ondes, suffisamment puissante pour être entendue de jour comme de nuit sur l'ensemble du territoire métropolitain. Le site choisi est Allouis, deux émetteurs, ayant chacun une puissance de 450 kW, y sont installés. L'ensemble est opérationnel en août 1939, au moment même de l'entrée en guerre. En 1944, les installations sont détruites et ce n'est qu'en 1952, que le site redevient opérationnel. L'émetteur pouvait fonctionner entre 160 et 190 kHz, c'est dans cette bande de fréquence que France Inter (162 kHz) sera utilisée.

### **Grandes Ondes (GO) ; Ondes Moyennes (OM) ; Ondes Courtes (OC)**

Il ne faut pas confondre le partage du spectre par décade de fréquence, comme nous le présentons ici, avec les classes d'émetteurs radio AM (à modulation d'amplitude). On distingue alors :

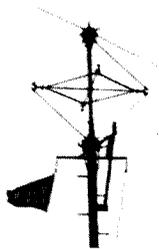
- Les Grandes Ondes (GO) couvrant les fréquences allant de 153 à 279 kHz, c'est donc une partie du spectre LF.
- Les Ondes Moyennes (OM) couvrant les fréquences allant de 531 à 1620 kHz. C'est donc une partie du spectre MF.
- Les Ondes Courtes (OC) couvrant les fréquences allant de 2310 à 25 820 kHz. C'est donc une petite partie du spectre MF (2310 à 3000 kHz) et une grande partie du spectre HF (3000 kHz à 25 820 kHz).

### *La bande MF (Medium Frequency)*

La bande MF couvre la région spectrale allant de 300 kHz à 3 MHz, soit en longueur d'onde, de 100 m (correspondant à 3 MHz) à 1 km (correspondant à 300 kHz). De ce fait, on parle également « d'ondes hectométriques ». Ces ondes se propagent encore par onde de sol, mais la longueur d'onde étant plus courte, il en est de même pour la portée, qui ne dépasse guère celle d'une région. Cette portée augmente la nuit parce qu'alors, ces ondes bénéficient de la propagation ionosphérique. Comme indiqué en encadré, on trouve dans cette bande spectrale les radios à Ondes Moyennes.

Il est probable que lors de la première liaison TSF transatlantique en 1901 par Marconi, la longueur d'onde transmise était aux alentours de 2000 m, c'est-à-dire dans la bande LF.

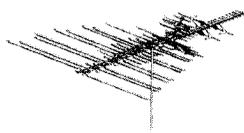
## La bande HF (High Frequency)



Antenne HF.

La bande HF couvre la région spectrale allant de 3 MHz à 30 MHz, soit en longueur d'onde, de 10 m (correspondant à 30 MHz) à 100 m (correspondant à 3 MHz). De ce fait, on parle également « d'ondes décamétriques ». Tandis que pour un domaine supérieur à 2-3 MHz, les ondes de sol ne portent guère au-delà de quelques dizaines de kilomètres, les ondes HF bénéficient de la propagation ionosphérique. Ces ondes se réfléchissent sur les couches de l'ionosphère, ce qui permet de s'affranchir du problème de l'horizon optique et d'obtenir en un seul bond, une portée de plusieurs milliers de kilomètres. Comme nous l'avons souligné (voir encadré), cette bande spectrale se confond presque avec celle utilisée par les radios à Ondes Courtes. C'est également le domaine des radioamateurs qui, on le sait, lorsque les circonstances sont favorables (la nuit dans des conditions ionosphériques calmes) peuvent avec des puissances très faibles (quelques milliwatts) réussir des liaisons intercontinentales.

## La bande VHF (Very High Frequency)



Antenne VHF.

La bande VHF couvre la région spectrale allant de 30 MHz à 300 MHz, soit en longueur d'onde, de 1 m (correspondant à 300 MHz) à 10 m (correspondant à 30 MHz). De ce fait, on parle également « d'ondes métriques » (ou plus rarement, d'ondes ultra-courtes). La bande VHF est très fortement utilisée, on y trouve, la télévision, les radios FM, la radio numérique, les transmissions VHF des avions, etc. Ces ondes se propagent principalement en ligne droite mais réussissent à contourner les obstacles de dimensions ne dépassant pas quelques mètres. Elles se réfléchissent sur les murs, rochers, et autres objets de moyennes dimensions. La portée d'un émetteur de 10 W est, pour une antenne omnidirectionnelle, de quelques dizaines de kilomètres. Certaines conditions physiques spécifiques peuvent augmenter cette portée à quelques centaines de kilomètres (effet d'indice de réfraction), voire même, plus de 1000 km (réflexion sur des nuages ionisés).

On a l'habitude de subdiviser la bande VHF en trois sous-bandes :

- La bande I s'étend de 47 à 68 MHz et est réservée pour la diffusion de la télévision (Canal Plus, par exemple).
- La bande II s'étend de 87,5 à 108 MHz. C'est sans doute la mieux connue en terme de fréquence puisqu'elle correspond à la radio FM (c'est-à-dire, par modulation de fréquence).
- La bande III s'étend de 174 à 221 MHz, elle est utilisée pour la diffusion de la télévision (TMC, par exemple), mais aussi pour la radio numérique DAB.

## La bande UHF (Ultra High Frequency)

La bande UHF couvre la région spectrale allant de 300 MHz à 3 GHz, soit en longueur d'onde, de 10 cm (correspondant à 3 GHz) à 1 m (correspondant à 300 MHz). De ce fait, on parle également « d'ondes décimétriques ». Plus la fréquence de l'onde augmente, plus son comportement ressemble à celui d'un rayon lumineux. Ces ondes se propagent donc en ligne droite et permettent des liaisons à vue (aucun obstacle de taille supérieure à quelques décimètres ne doit se trouver sur le trajet du faisceau). On se retrouve dans une situation similaire au télégraphe de Chappe à deux différences essentielles près. La première concerne le débit d'information qui est des milliards de fois plus élevé, et deuxièmement la communication peut se faire par tous les temps.

On a l'habitude de subdiviser la bande UHF en deux sous-bandes :

- La bande IV, qui s'étend de 470 à 600 MHz. Elle est utilisée pour la diffusion de la télévision.
- La bande V, qui s'étend de 614 à 862 MHz. Elle est également utilisée pour la diffusion de la télévision.

Les téléphones mobiles utilisent également la bande UHF :

- Les GSM portables utilisent la bande allant de 890 à 915 MHz pour l'émission, et la bande allant de 935 à 960 MHz pour la réception.
- Les nouveaux réseaux [GSM 1800 et DCS 1800 (DCS pour *Digital Cellular System*)] utilisent la bande allant de 1790 à 1815 MHz pour l'émission, et la bande allant de 1835 à 1860 MHz pour la réception.
- Les réseaux asiatiques et américains émettent sur du 1900 MHz.

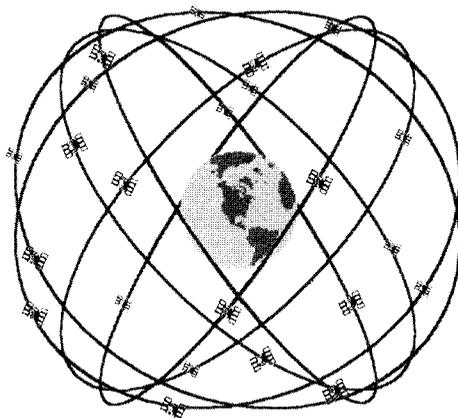
Nous avons indiqué que les ondes UHF se déplacent en ligne droite et ce sont pourtant elles que l'on utilise (y compris en ville) pour le téléphone mobile ! En fait, c'est grâce aux réflexions sur les bâtiments qu'il est possible d'utiliser un téléphone portable sans être en vue directe de l'antenne du relais. Toutefois, les interférences entre ondes réfléchies rendent parfois la communication difficile, obligeant l'utilisateur à changer d'endroit ou à se déplacer de quelques mètres seulement.

Le GPS utilise également la bande UHF. Le GPS est basé sur une constellation de 26 satellites, orbitant autour de la terre à environ 20 000 km d'altitude. Ces satellites émettent en continu, un signal radio sur deux fréquences (1,2 et 1,5 GHz). La longueur d'onde associée est donc d'environ 20 cm. Comme les récepteurs sont capables de détecter

On trouve, autour de 400 MHz, de nombreuses applications comme les cartes intelligentes, les systèmes de téléprotection et télésurveillance, les systèmes de commande de portières de voitures, etc.

une fraction de longueur d'onde, la précision (actuellement de l'ordre du mètre) peut devenir millimétrique.

Les satellites GPS  
utilisant la  
bande UHF.



Les fours à micro-ondes émettent une fréquence relativement proche (2450 MHz) mais ils sont conçus pour limiter au maximum les émissions externes. Bien que la puissance d'émission d'un GSM soit de 2 W et que celle d'un four est plutôt de l'ordre de 1000 W, leurs « fuites électromagnétiques » ne dépassent pas 0,005 W, soit 400 fois moins que les téléphones mobiles !

Par ailleurs, notons que le Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) utilise la bande de fréquence des 2,4 GHz.

### *La bande SHF (Super High Frequency)*

La bande SHF couvre la région spectrale allant de 3 GHz à 30 GHz, soit en longueur d'onde, de 1 cm (correspondant à 30 GHz) à 10 cm (correspondant à 3 GHz). De ce fait, on parle également « d'ondes centimétriques ». Compte tenu de la très faible longueur d'onde, la propagation se fait en ligne droite. Les fréquences très élevées permettent de bénéficier d'une grande bande passante et d'un très grand débit. Citons, parmi les nombreuses applications de cette bande : la radiolocalisation ; la radionavigation ; la radioaltimétrie ; l'identification automatique de véhicules ; les liaisons satellite-terre ; les liaisons terre-satellite ; les liaisons inter-satellite ; les usages industriels, scientifiques et médicaux, etc.

### *La bande EHF (Extremely High Frequency)*

La bande EHF couvre la région spectrale allant de 30 GHz à 300 GHz, soit en longueur d'onde, de 1 mm (correspondant à 300 GHz) à 1 cm (correspondant à 30 GHz). De ce fait, on parle également « d'ondes millimétriques ». On retrouve dans cette bande, des utilisations similaires à celles vues dans la bande SHF. Néanmoins, d'autres usages sont prévus comme le LMDS (*Local Multipoint Distribution Service*) ;

des services associés au sans fil (applications *Wireless*) tels que les transmissions point-multipoints à 40 GHz ; et plus novateur, des stations d'émissions positionnées dans la stratosphère (portées par ballons stratosphériques) permettant la distribution Internet sur des zones assez larges (la liaison montante utiliserait la bande allant de 47,2 à 47,5 GHz, tandis que la liaison descendante se ferait dans la bande allant de 47,9 à 49,2 GHz). L'utilisation des ondes millimétriques pour les communications sans fil présentera l'avantage de disposer d'émetteurs- récepteurs compacts et à faible coût, pouvant offrir de très hauts débits de transmission. Les fréquences utilisées pourraient être autour de 60 GHz. La forte atténuation existant à 60 GHz, en réservera l'usage pour des transmissions à faible portée de type intra-muros. Les ondes de 90 GHz sont moins atténuées que celles de 60 GHz. On peut s'attendre à voir apparaître sur le marché, de plus en plus de produits utilisant cette bande. Parmi les nombreuses applications possibles, citons-en quelques-unes.

Dans le domaine civil : les systèmes d'atterrissage tous temps, les réseaux locaux sécurisés, la détection d'armes camouflées (l'imagerie millimétrique permet la détection des objets non métalliques), l'identification à distance, etc.

Dans le domaine militaire : les munitions intelligentes, les communications sécurisées, l'identification IFF radio, etc.

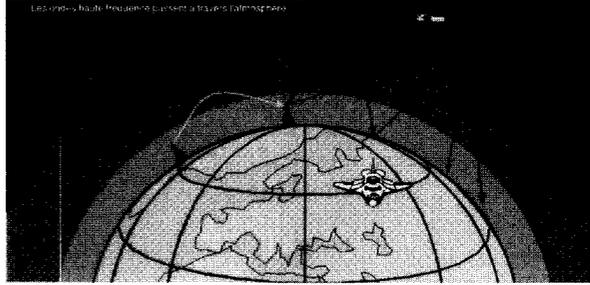
### **Propagation des ondes**

Les ondes de fréquences inférieures à 30 MHz ( $\lambda > 10$  m) peuvent se propager de trois façons différentes

- Par « onde de sol ». Ce mode de propagation est d'autant plus efficace que la fréquence est basse.
- Par « onde d'espace ». L'onde se propage alors directement d'un point à un autre, comme le ferait une onde lumineuse. Il y a une liaison directe entre l'émetteur et le récepteur. Toutefois, l'onde peut être diffractée par des obstacles. C'est ainsi que, même si l'on ne se trouve pas en vue directe de l'émetteur (zone d'ombre), on peut recevoir un signal, car l'onde a été diffractée, par exemple, par le sommet d'une colline.
- Par propagation ionosphérique. L'onde rebondit dans ce cas sur les couches supérieures de l'ionosphère, permettant ainsi des communications transhorizon. Ce mode de propagation est particulièrement important dans la bande allant de 3 à 30 MHz. L'ionosphère agit vis-à-vis de ces ondes véritablement comme un

« bouclier » métallique qui serait situé dans la haute atmosphère. De la même façon qu'une onde lumineuse se réfléchit sur un métal, une onde électromagnétique se réfléchit sur l'ionosphère (il s'agit en fait du même phénomène physique : la réflexion d'une onde sur un plasma). L'ionosphère est un plasma peu dense, tandis qu'un métal peut être considéré comme un plasma dense, d'où la différence de seuil en longueur d'onde de la réflexion.

Impact de  
l'ionosphère sur la  
propagation.



Les ondes de fréquences supérieures à 30 MHz ( $\lambda < 10$  m) se propagent comme le ferait un rayon lumineux, à cela près qu'elles peuvent traverser les nuages et la pluie sans affaiblissement sensible. Toutefois, pour des longueurs d'onde inférieures à 10 cm ( $\nu > 3$  GHz), la pluie commence à devenir opaque et le devient fortement en deça de 3 cm (10 GHz).

## Les différentes bandes radar

### Présentation

Les ondes électromagnétiques sont également à l'origine de l'extraordinaire développement du radar<sup>3</sup>. Malheureusement, la désignation des différentes bandes radar ne coïncide pas avec celle des bandes radio. Le tableau page 170 en fait la synthèse. Seule la première bande, VHF (de 30 à 300 MHz) est identique (mais relativement peu usitée). La seconde, malgré un nom identique (UHF) ne correspond pas aux mêmes extrémités fréquentielles (de 300 MHz à 3 GHz, dans le cas de la radio et de 300 MHz à 1 GHz, dans le cas du radar). Les autres ne possèdent ni les mêmes noms, ni naturellement les mêmes désignations. Il y a donc un vocabulaire radio et un vocabulaire radar. Notons que cette différence

<sup>3</sup> Pour mieux connaître l'histoire et le développement du radar, on pourra se référer au livre à la fois très complet et remarquablement didactique suivant : *Le radar, 1904-2004, histoire d'un siècle d'innovations techniques et opérationnelles*, Yves Blanchard, Éditions Ellipses, 2004.

ne s'exprime pas seulement en terme de fréquence. Par exemple, tandis que les gens de la radio désignent l'intensité du champ à l'aide de l'amplitude du champ électrique ( $E$  en volt par mètre), les radaristes préfèrent utiliser la notion de puissance surfacique ( $P_s$  en  $W/m^2$ ). Il existe entre les deux une correspondance simple :  $P_s = 1/377 \times E^2$ .

### **Puissance radar : ne pas confondre émission et réception !**

La puissance émise par le radar et la puissance qu'il reçoit du fait de « l'écho radar » sont considérablement différentes. On peut par exemple, émettre une impulsion de 1 MW ( $10^6$  W) et ne recevoir que 1 nW ( $10^{-9}$  W). Cette proportion est la même que celle qui existe entre 30 millions d'années et une seconde... On peut toutefois, faire beaucoup mieux : dans le cadre d'un test de confirmation de la relativité générale (appelé test de Shapiro), un signal radar (émettant 400 kW) a été envoyé sur Vénus et l'écho produit sur cette planète a été détecté sur Terre. La puissance du signal de retour à détecter n'était que d'un millième de milliardième de milliardième de watt ( $10^{-21}$  W) ! En reprenant l'image temporelle, cette proportion est cette fois, la même que celle qui existe entre un milliard de fois l'âge de l'Univers et une seconde !

On remarque tout de suite, en consultant le tableau, que les fréquences utilisées en radar se trouvent dans la partie haute du spectre (30 MHz à 90 GHz). La problématique apparaît mieux lorsque l'on raisonne en terme de longueurs d'onde : celles-ci s'échelonnent entre 10 m (30 MHz) et 3 mm (90 GHz). La raison principale est qu'un obstacle ne renvoie une quantité appréciable d'énergie que si ses dimensions ne sont pas trop inférieures à la longueur d'onde. Ainsi, pour détecter des bouées ou des périscopes de sous-marins, on utilise les ondes centimétriques (30 GHz). D'autre part, la concentration de l'énergie rayonnée dans une direction privilégiée (celle de l'objet à détecter) se fait d'autant plus facilement que la longueur d'onde est faible, ce qui est de nouveau en faveur des hautes fréquences.

Cependant, plus la fréquence est élevée, plus il est difficile de concevoir des générateurs puissants. Ainsi, au début de la seconde guerre mondiale, on ne pouvait pas, en pratique, réaliser des radars ayant une longueur d'onde plus petite que le mètre (soit une fréquence supérieure à 300 MHz). En revanche, une faible longueur d'onde permet de réaliser de petites antennes. À l'inverse, tant que l'on n'a pas su maîtriser cette gamme on a eu recours à de grandes antennes, ce qui interdisait l'usage aéroporté.

Nomenclature des fréquences radar proposée par l'IEEE et adoptée universellement.

Désignation	Domaine de fréquences (GHz)
VHF	0,03-0,30
UHF	0,30-1,00
Bande L	1-2
Bande S	2-4
Bande C	4-8
Bande X	8-12
Bande Ku	12-18
Bande K	18-26,5
Bande Ka	26,5-40
Bande Q	33-50
Bande U	40-60
Bande V	50-75
Bande E	60-90

On peut s'étonner du choix de cette nomenclature (L, S, C, X, K). Elle a été adoptée durant la seconde guerre mondiale comme un code secret. Ceci permettait aux scientifiques et aux ingénieurs de ne pas divulguer les bandes de fréquences correspondantes. À la fin de la guerre, le code a été déclassifié et la bande millimétrique ajoutée. Néanmoins, l'usage de cette nomenclature est resté.

### La course aux petites longueurs d'onde

*Gagner un facteur 10 sur la longueur d'onde (par exemple, en passant de  $\lambda = 100$  cm à  $\lambda = 10$  cm) permet, à performances égales, de réduire les dimensions de l'antenne radar d'un facteur 10. Si l'on ne cherche pas à réduire les dimensions de l'antenne, on gagne un facteur 10 sur la précision angulaire de la mesure.*

1904 : Le Telemobiloskop d'Hülzmeyer utilise probablement une longueur d'onde ( $\lambda$ ) voisine de 4 m.

1927 : Gutton observe des réflexions pour  $\lambda = 16$  cm.

1934 : Pintsch réussit une détection jusqu'à 2 km avec  $\lambda = 13,5$  cm.

1935 : Ponte et Gutton installent sur la Normandie un « système de détection d'obstacles » qui est considéré comme le premier radar centimétrique de l'histoire.

1935 : Les allemands réalisent une maquette de radar à impulsion qui leur permet de détecter le passage d'un hydravion à 75 km, à une longueur d'onde de 48 cm.

1935 : Les anglais détectent le passage d'un avion à 100 km, à une longueur d'onde de 26 m.

1936 : Les américains abandonnent un instant la course vers le centimétrique et détectent, à un peu plus de 10 km, le passage d'un avion à une longueur d'onde de 3 m.

1939 : Les américains (RCA) produisent, en série, un radar de veille capable de détecter les avions jusqu'à 180 km ( $\lambda = 1,5$  m).

1941 : Défaillance du radar de surveillance de Pearl Harbour, la détection de l'arrivée des 400 avions japonais a été loupée de très peu (pour plus de détail, voir le livre précédemment signalé d'Yves Blanchard, *Le radar, 1904-2004*, pages 197 & 198).

1943 : Les radars à ondes centimétriques deviennent militairement utilisables.

1947 : Les radars sont utilisés pour guider les atterrissages d'avions. On compte déjà en 1947, plus de 20 000 atterrissages guidés.



Christian Hülsmeyer, inventeur du radar.

### *Les radars en bande L*

Les radars en bande L couvrent la région spectrale allant de 1 à 2 GHz, soit en longueur d'onde, de 15 cm (correspondant à 2 GHz) à 30 cm (correspondant à 1 GHz). Il s'agit donc « d'ondes décimétriques ».

### *Les radars en bande S*

Les radars en bande S couvrent la région spectrale allant de 2 à 4 GHz, soit en longueur d'onde, de 15 cm (correspondant à 2 GHz) à 8 cm (correspondant à 4 GHz). Il s'agit donc plutôt, d'ondes centimétriques. À cette longueur d'onde, ils bénéficient d'une atténuation atmosphérique faible. Ils sont en particulier utilisés comme radar météo. C'est ainsi que le service météo national américain (*National Weather Service : NWS*) utilise des radars en bande S, à une longueur d'onde d'environ 10 cm. L'inconvénient de tels radars est la dimension de leur antenne d'émission (plusieurs mètres).

### *Les radars en bande C*

Les radars en bande C couvrent la région spectrale allant de 4 à 8 GHz, soit en longueur d'onde, de 8 cm (correspondant à 4 GHz) à 4 cm (correspondant à 8 GHz). Il s'agit donc vraiment d'ondes centimétriques. À cette longueur d'onde, l'atténuation atmosphérique est plus forte qu'en bande S. En revanche, la dimension de leur antenne d'émission est plus faible ainsi que la puissance requise. Ils sont quelquefois utilisés pour réaliser des stations de télévisions privées.

## *Les radars en bande X*

Les radars en bande X couvrent la région spectrale allant de 8 à 12 GHz, soit en longueur d'onde, de 4 cm (correspondant à 8 GHz) à 2,5 cm (correspondant à 12 GHz). Il s'agit encore d'ondes centimétriques. La longueur d'onde étant plus faible, ils ont la capacité de détecter des objets de plus petites dimensions. Dans le domaine météo, ils sont utilisés pour la détection de formation de nuages (réflexion par les gouttes de pluie) ainsi que pour suivre les précipitations de neige. La taille de l'antenne étant plus faible, ils sont embarquables sur avion, aussi bien militaire (détection air-air) que civil (détection de turbulences et autres phénomènes atmosphériques). La police utilise également des radars en bande X pour le contrôle de vitesse.

## *Les radars en bande K*

Les radars en bande K couvrent la région spectrale allant de 12 à 40 GHz, soit en longueur d'onde, de 2,5 cm (correspondant à 12 GHz) à 0,75 cm (correspondant à 40 GHz). Nous ne détaillerons pas les sous-bandes Ku (12 à 18 GHz) ; K (18 à 26,5 GHz) et Ka (26,5 à 40 GHz). L'origine de cet éclatement est dû au fait que la bande centrale (18 à 26,5 GHz) est très facilement absorbée par la vapeur d'eau et donc se propage très mal dans l'atmosphère. Cette bande est assez similaire à la bande X, mais permet d'obtenir (grâce aux plus faibles longueurs d'onde) une meilleure résolution. Certains radars de police utilisent également cette bande.

## *Les radars millimétriques*

Les radars en bandes Q, U, V et E couvrent la région spectrale allant de 33 à 90 GHz. Ce sont des radars millimétriques car les longueurs d'onde correspondantes s'échelonnent de 9 mm (correspondant à 33 GHz) à 3 mm (correspondant à 90 GHz). L'une des fréquences les plus connues est celle de 77 GHz (~ mm) car elle est dédiée aux radars anticollision automobile. Une autre fréquence qui commence à être très utilisée est celle de 94 GHz. En effet, à cette fréquence, les micro-ondes pénètrent les nuages de glace quasiment sans atténuation. Dans cette bande de fréquence, le signal radar étant très sensible à la taille des particules (loi en puissance 6), il ne verra pas les aérosols, et sera plus sensible aux nuages de glace qu'aux nuages d'eau liquide. Ce type de radar permet également de détecter les précipitations. De plus, il discerne à la fois le sommet et la base des nuages, même lorsque ces derniers sont épais (mais quand ils ne précipitent pas).

## Les radars transhorizon

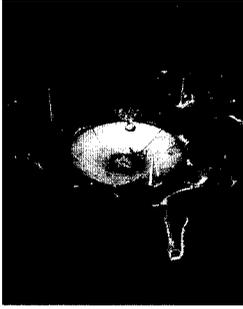
En utilisant des fréquences basses (30 MHz et moins), on bénéficie de la réflexion des ondes sur l'ionosphère. Cela permet de réaliser des radars transhorizon, c'est-à-dire qui détectent au-delà de l'horizon. Un « démonstrateur » d'un tel radar a été construit en France, il répond au nom de Nostradamus. Grâce à trois cents antennes implantées en étoile, ce radar a une portée qui peut atteindre 2000 km. De plus, il « voit » dans toutes les directions sur 360°. Ainsi, il est par exemple, possible de localiser un avion se trouvant à 1700 kilomètres de distance avec une précision de 5 km ! Les radars transhorizon peuvent être aussi bien utilisés à des fins civiles qu'à des fins militaires. Un radar transhorizon (d'un type différent de celui de Nostradamus) situé au centre de l'Australie, permet, par exemple, de surveiller globalement les avions survolant l'ensemble du territoire australien. Enfin, pendant la guerre froide, les russes, comme les américains, ont installé un ensemble de radars transhorizon sur le nord de leur territoire (Sibérie et Alaska) pour se surveiller mutuellement.

Les fréquences de 35 GHz (radar anticollision), 94 GHz (radar météo) et 140 GHz, correspondent à des fenêtres atmosphériques, d'où leur utilisation privilégiée.

## Utilisation des ondes électromagnétiques en radioastronomie

Différents phénomènes astrophysiques génèrent des ondes électromagnétiques qu'il est extrêmement intéressant d'analyser sur terre (pour peu que ces ondes soient dans une fenêtre de transparence atmosphérique). On distingue classiquement la radioastronomie centimétrique, la radioastronomie millimétrique et la radioastronomie sub-millimétrique. La radioastronomie a bénéficié des acquis du radar. En France par exemple, le professeur Yves Rocard<sup>4</sup> a utilisé à Nançay, à partir de 1953, deux antennes radar (de type Würzburg, développées par Telefunken en 1940), pour réaliser un radiotélescope. De nouvelles antennes spécifiques lui permirent de faire de Nançay l'un des plus grands radiotélescopes du monde. De même, en Angleterre, le grand radariste Bernard Lovell a été l'initiateur, en 1950, de la construction du radiotélescope de Jodrell Bank de 75 m de diamètre.

<sup>4</sup> Par un curieux hasard de circonstance, le professeur Yves Rocard habitait au 87 boulevard Saint-Michel, là-même où vivait (de 1928 à 1940) Édouard Branly avec sa fille, son gendre et ses petites filles. Il arrivait que ces dernières jouent dans l'entrée de l'immeuble avec son fils, Michel Rocard, futur Premier ministre.



Radiotélescope  
d'Arecibo.

## Radioastronomie centimétrique

Les longueurs d'onde détectées en radioastronomie centimétrique vont de 100 cm (300 MHz) à 0,3 cm (100 GHz) (ce qui correspond à la totalité des bandes UHF et SHF et une partie de la bande EHF). Citons quelques observatoires renommés :

- Arecibo (à Porto Rico) : l'antenne de 305 m de diamètre est implantée dans une cuvette naturelle, elle permet de détecter les ondes centimétriques et même au-delà (de 3 cm à 600 cm).
- Le « Green Bank Interferometer » (GBI) situé aux États-Unis dans l'état de Virginie. Il est constitué de 3 radiotélescopes de 26 m et permet de détecter les ondes centimétriques (de 3,6 à 13,3 cm).
- Le radiotélescope de Nancay, en France.
- Le « *Very Large Array* » (VLA) situé aux États-Unis dans l'État du Nouveau-Mexique. Il est constitué de 27 antennes de 25 m (230 tonnes/antenne) disposées le long de 3 bras en Y. Il permet de détecter les ondes centimétriques (de 0,6 à 100 cm).
- Citons également, sans détailler ni les sigles, ni les performances (par ailleurs, facilement retrouvables sur Internet, avec un bon moteur de recherche) de quelques autres radiotélescopes centimétriques : ATCA, Effelsberg, GBT, SKA.

## Radioastronomie millimétrique

Les longueurs d'onde détectées en radioastronomie millimétrique sont centrées sur 3 mm (80 à 115 GHz) et sur 1 mm (210 à 250 GHz) (ces ondes sont donc situées dans une partie de la bande EHF). Citons quelques observatoires actuels ou futurs :

- Le projet ALMA (« *Atacama Large Millimeter Array* ») (situé à 5000 m d'altitude dans le désert d'Atacama au Chili). Il sera constitué de 64 antennes de 12 m de diamètre et pourra explorer les domaines millimétriques et sub-millimétriques.
- Le « *Large Millimeter Telescope* » (LMT), dont l'antenne fera 50 m de diamètre.
- Le Plateau de Bure (situé en France dans les Hautes-Alpes à une altitude de 2500 m). Il est constitué de 5 antennes de 15 m de diamètre, et permet de détecter des ondes ayant des longueurs d'ondes de l'ordre de 1 mm.
- Citons également, sans détailler ni les sigles, ni les performances de quelques autres radiotélescopes millimétriques : BIMA, CARMA, FCRAO, NRAO, NMA, OVRO, IRAM, ...

## Radioastronomie sub-millimétrique

Les longueurs d'onde détectées en radioastronomie sub-millimétrique vont de 1 mm (300 GHz) à 0,3 mm (3000 GHz) [ces ondes sont donc situées au-delà de la bande EHF, on parle « d'ondes TéraHertz » (puisqu'elles couvrent la bande allant de 0,3 à 1 THz)]. Citons quelques observatoires renommés :

- L' « *Antarctic Submillimeter Telescope and Remote Observatory* » (AST/RO), situé en Antarctique est intégré à la station d'Amundsen-Scott au Pôle Sud. L'antenne de 1,7 m permet des observations millimétriques et sub-millimétriques.
- Le « *James Clerk Maxwell Telescope* » (JCMT), situé sur le mont Mauna Kea à Hawaii. Son antenne de 15 m, observe dans un domaine allant de 3 à 0,3 mm.
- Le « *Heinrich Hertz Submillimeter Telescope Observatory* » (HHT/SMTO), situé sur le Mont Graham en Arizona et muni d'une antenne de 10 m de diamètre.
- Citons également, sans détailler ni les sigles, ni les performances de quelques autres radiotélescopes sub-millimétriques : APEX ; ASTE ; CSO ; KOSMA : Mt Fuji ; SPST ; SMA ; SWAS ; SEST, ...

## Les ondes THz

---

### Présentation

On assiste actuellement à la jonction entre les hyperfréquences (considérées comme faisant partie de l'électromagnétisme) et l'infrarouge (considérées comme faisant partie de l'optique, cf. paragraphe suivant). Cette zone intermédiaire correspond aux ondes THz (1 THz =  $10^{12}$  Hz = 1000 GHz). Le domaine THz (térahertz) couvre la région spectrale allant de 0,1 THz à 10 THz, soit en longueur d'onde, de 3 mm (correspondant à 0,1 THz) à 30  $\mu$ m (correspondant à 10 THz). C'est donc la suite logique des ondes millimétriques. On aurait pu également parler, comme on le fait en radioastronomie, d'ondes sub-millimétriques. Pour donner un petit côté mystérieux à la chose, on les appelle également quelques fois les « rayons T » (T pour THz). Ce domaine est en pleine expansion, on considère qu'il y a aujourd'hui dans le monde, plus de 80 groupes de recherche travaillant sur ce sujet. Nous évoquerons ici, principalement les applications potentielles. À l'heure actuelle, la difficulté principale consiste à disposer de sources et de détecteurs dans cette gamme de longueur d'onde.

## Les applications des ondes THz

Les ondes THz sont potentiellement applicables à la sécurité, aux domaines médical et pharmaceutique ainsi qu'aux télécommunications.

Dans le domaine de la sécurité, la principale spécificité de ces ondes est qu'elles peuvent se propager à courtes distances, dans les matériaux solides. Par exemple, les textiles, le papier, le bois, ou certains revêtements (ce que font également les ondes millimétriques). La capacité à se propager à travers les vêtements et à se réfléchir sur la peau (à cause de l'eau qu'elle contient) font des ondes THz de véritables « rayons qui déshabillent » (cette propriété attribuée, à tort, lors des débuts des rayons X, se trouve dans ce cas, parfaitement justifiée). Ainsi, lorsqu'un terroriste passera sous un futur portique THz, tout ce qu'il cache sous ses vêtements, même les objets non métalliques, comme un couteau en céramique ou un explosif plastique, apparaîtront clairement. Le fait que ces rayons déshabillent, pose d'ailleurs un problème déontologique d'emploi (des solutions un peu différentes, en cours d'étude, qui seraient ici trop longues à développer, permettront sans doute de s'affranchir de ce délicat problème). On peut donc envisager avec confiance les applications sécuritaires offertes par les THz. On peut réaliser de véritables photos en THz (on parle plutôt dans ce cas d'imagerie). Le temps de pose dépend naturellement de la puissance de l'émetteur. La longueur d'onde des THz étant inférieure à celle des ondes millimétriques, la résolution spatiale est meilleure. Il n'est pas impossible qu'à terme, ces deux bandes soient utilisées, les THz permettant de faire un « zoom » sur un détail suspect.

Si Édouard Branly vivait de nos jours, il serait probablement enthousiasmé par les recherches dans ce domaine, à la frontière entre la physique (en particulier celle des ondes) et de la médecine. Rappelons que sa thèse de médecine portait sur le « Dosage de l'hémoglobine dans le sang par des procédés optiques ».

Dans le domaine médical, les recherches se concentrent sur la détection de cancers, en particulier de cancers de la peau. On peut en effet, grâce aux ondes THz, distinguer une peau saine d'une peau cancéreuse. Cela vient de la propriété de ces ondes de pouvoir traverser la couche externe de la peau sur environ 1 mm.

Dans le domaine pharmaceutique, les THz sont d'une aide précieuse à la conception de l'enrobage des médicaments sous forme de pilules. En effet, les produits utilisés pour faire ces enrobages peuvent se cristalliser de plusieurs façons (c'est ce que l'on appelle le polymorphisme). Or, le taux de dissolution d'un même produit dépend très largement de sa structure cristalline particulière (jusqu'à un facteur 500 !). La cinétique de dissolution de la pilule dans l'estomac est très importante sur son action. On peut vouloir une dissolution rapide, ou au contraire progressive. Les techniques THz (et en particulier, l'imagerie THz) permettent d'optimiser ces enrobages.

Dans le domaine des télécommunications, les THz sont extrêmement attractifs car plus la fréquence est élevée, plus la bande passante est large. On peut donc faire passer un énorme débit d'informations. Le problème est que les THz sont fortement atténuées par la vapeur d'eau. Cela en rend la portée faible (une centaine de mètres au mieux) et très dépendante des conditions météorologiques (les ondes THz voyageant en ligne droite, à la façon d'un rayon lumineux, il s'agit de liaison « point à point ». On parle de « communication en espace libre »). On peut, par exemple, imaginer de les utiliser pour assurer des transmissions sécurisées puisque, au-delà d'une certaine distance, on est sûr que le signal ne pourra pas être capté !

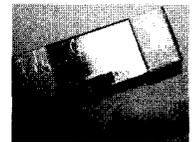
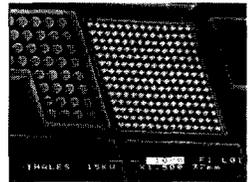
## Émission et détection des ondes THz

Aujourd'hui, les sources existantes sont très peu puissantes. On peut générer des THz par le battement entre deux lasers, ou en utilisant un laser bifréquence, associé à un photomélangeur. Ces sources sont opérationnelles, mais une taille raisonnable limite la puissance

### Les QCL (*Quantum Cascade Laser*)

Le comportement d'un électron dans un puits quantique est très similaire à celui d'une onde électromagnétique dans un guide optique. On peut réaliser dans un dispositif semi-conducteur (à l'aide de deux hétérojonctions), un profil de potentiel qui confine le mouvement des électrons dans une direction. Le mouvement des électrons est alors quantifié dans cette direction (celle de la croissance de la couche de semi-conducteur) et les niveaux d'énergie correspondant aux mouvements des électrons dans ce sens, sont discrets. Il y a apparition de sous-bandes d'énergie. Lorsque des électrons passent d'une sous-bande permise à une autre, ils émettent des photons. On réalise ainsi, un laser dit à cascade quantique (appelé QCL pour *Quantum Cascade Laser*).

Notons qu'inversement, lorsque des photons arrivent sur le puits quantique, ils provoquent des transitions optiques entre ces sous-bandes. Ils peuvent ainsi, être détectés. C'est le principe des détecteurs à puits quantiques (que l'on appelle QWIP pour *Quantum Well Infrared Photodetector*). Une variation de dopage entraîne une variation entre les niveaux énergétiques et, par conséquent, permet d'ajuster la longueur d'onde émise ou détectée. À l'heure actuelle, les QWIP peuvent être utilisés dans la bande spectrale 3-20  $\mu\text{m}$ . Pour certaines raisons physiques, il n'est pas certain que l'on puisse étendre leur domaine de détection jusqu'à la bande THz.



Lasers à cascade quantique.

d'émission THz à des valeurs comprises entre le  $\mu\text{W}$  à la centaine de  $\mu\text{W}$ . Les lasers à cascade quantique (QCL : *Quantum Cascade Laser*) émettent dans l'infrarouge, jusqu'à la zone des THz (au-dessus de 3 THz, soit pour des longueurs d'onde inférieures à 100  $\mu\text{m}$ ). Ces lasers QCL permettront d'atteindre une gamme de puissance autour du mW. Pour obtenir des sources plus puissantes (aux alentours du Watt, voire un peu au-dessus), il faudra avoir recours à des techniques de type tube. Les échelles associées aux THz étant la centaine de microns, il faut pouvoir maîtriser la technologie des cathodes et des tubes à cette échelle. Ce n'est pas le lieu ici de développer ces aspects, disons simplement que les techniques actuelles permettent d'envisager d'atteindre de telles performances (la société *Thales Electron Devices* a développé, il y a déjà plusieurs années, des tubes appelés « carcinotron », fonctionnant à 0,5 THz).

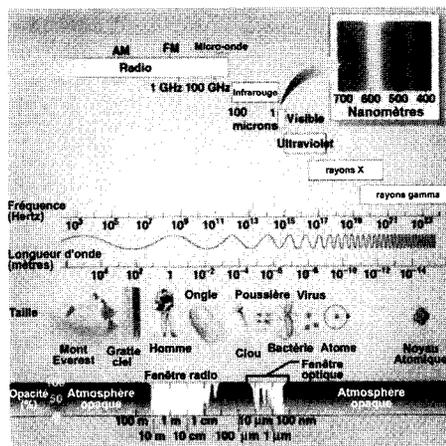
Les détecteurs THz sont également délicats à mettre au point. Compte tenu des faibles puissances à mesurer, le détecteur le plus utilisé actuellement, est le bolomètre, qui présente tout de même l'inconvénient de devoir être refroidi à 4 K (soit  $-269^\circ\text{C}$ ).

## Les ondes optiques

### Présentation

Si l'on continue à progresser vers les fréquences plus élevées (ou, ce qui revient au même, vers les longueurs d'onde plus faibles), on arrive dans le domaine optique. On y distingue trois domaines : l'infrarouge

Spectre électromagnétique.



(découvert en 1800, par Herschel, cf. chapitre 2), le visible (connu depuis l'Antiquité) et l'ultraviolet (découvert en 1801, par Ritter, cf. chapitre 2). Comme nous l'avons indiqué, il y a maintenant un recouvrement complet entre le monde des hyperfréquences et celui de l'optique. En terme de fréquence, nous allons donc découvrir l'au-delà THz. Toutefois, les habitudes (communément adoptées) font que l'on s'exprime plutôt en terme de longueur d'onde en optique.

## L'infrarouge

Le domaine infrarouge est très vaste, puisqu'il s'étend de 50  $\mu\text{m}$  (6 THz) à 0,8  $\mu\text{m}$  (~ 400 THz). On le découpe lui-même en sous-ensembles.

- **Domaine VLWIR (*Very Long Wave InfraRed*)**

Ce domaine couvre la bande allant de 16 à 50  $\mu\text{m}$ . L'atmosphère, dans cette bande, est opaque, de sorte que les applications sont essentiellement celles de l'astronomie spatiale. Les détecteurs doivent être bien refroidis, jusqu'à une température inférieure à 5 K (soit, -268 °C). On utilise essentiellement les photo-conducteurs extrinsèques (< 5 K) [Ge : Sb (jusqu'à 120  $\mu\text{m}$ ) ; Si : Zn (jusqu'à 40  $\mu\text{m}$ ) ; Ge : Cu (jusqu'à 30  $\mu\text{m}$ ) ; Ge : Cd (jusqu'à 23  $\mu\text{m}$ )]. Notons que l'on peut également utiliser des détecteurs bolométriques, pyroélectriques ou des thermopiles.

- **Domaine LWIR (*Long Wave InfraRed*)**

Ce domaine couvre la bande allant de 8 à 16  $\mu\text{m}$ . L'atmosphère dans cette bande, est transparente, ce qui la rend très utile, aussi bien pour l'observation de nuit (jumelle infrarouge) que pour les applications astronomiques quelles soient spatiales ou terrestres. On utilise dans cette partie du spectre, aussi bien des détecteurs de type photoconducteurs intrinsèques [HgCdTe ou PbSnTe (jusqu'à 12  $\mu\text{m}$ )], que des QWIP. Ces détecteurs doivent être refroidis à une température de l'ordre de 77 K (soit - 196 °C), ce qui – contrairement aux apparences – est assez facile puisqu'il suffit, par exemple, d'utiliser de l'azote liquide (beaucoup moins cher que l'essence !). On peut également utiliser, comme dans la bande VLWIR, des photoconducteurs extrinsèques [ Ge : Hg (jusqu'à 14  $\mu\text{m}$ ) ou Si : Ga (jusqu'à 17  $\mu\text{m}$ )]. Dans ce cas, les détecteurs doivent être refroidis à une température inférieure à 30 K (soit - 243 °C). Ces détecteurs ont tendance à être supplantés par les QWIP, permettant ainsi, de faire plus facilement de l'imagerie (barrettes ou matrices).

- *Domaine MWIR (Medium Wave InfraRed)*

Ce domaine couvre la bande allant de 3 à 5  $\mu\text{m}$ . L'atmosphère, dans cette bande, est également transparente, d'où des applications similaires à la bande LWIR : observation de nuit (jumelle infrarouge) et applications astronomiques tant spatiales que terrestres. On utilise dans cette partie du spectre, des détecteurs de type photoconducteur [PbTe (jusqu'à 4,4  $\mu\text{m}$ ) ; InSb (jusqu'à 5,6  $\mu\text{m}$ ) ; PbSe (jusqu'à 6,0  $\mu\text{m}$ )]. Ces détecteurs doivent être refroidis à des températures comprises entre 77 K (soit  $-196\text{ }^\circ\text{C}$ ) et 295 K (soit  $+22\text{ }^\circ\text{C}$ ). La température de fonctionnement des détecteurs dans cette bande, rend leur utilisation plus aisée que dans la bande LWIR. On peut également utiliser des détecteurs photovoltaïques, type InSb. De la même façon que précédemment, les détecteurs QWIP sont également utilisables dans cette bande.

- *Domaine NWIR (Near Wave InfraRed)*

Ce domaine couvre la bande allant de 0,8 à 2  $\mu\text{m}$ . L'atmosphère dans cette bande est transparente, d'où son intérêt. Parmi les nombreuses applications de cette bande, on peut citer l'observation de la terre depuis l'espace pour voir l'évolution de la végétation, détecter les incendies, etc. On utilise dans cette partie du spectre, des détecteurs de type photoconducteur [PbS ; InSb ; PbSe], ainsi que des photodiodes [Si (jusqu'à 1,2  $\mu\text{m}$ ) ; AsGa (jusqu'à 1,5  $\mu\text{m}$ ) ; Ga (jusqu'à 1,8  $\mu\text{m}$ )]. Dans cette bande de longueur d'onde, les détecteurs n'ont pas besoin d'être refroidis, ou très peu.

## *Le visible*

Le rayonnement visible, pourtant si utile et si riche, ne couvre qu'une très faible partie du spectre s'étendant de 0,8  $\mu\text{m}$  ( $\sim 400\text{ THz}$ ) à 0,4  $\mu\text{m}$  (750 THz). À chaque longueur d'onde, correspond une couleur : le violet (0,4 à 0,45  $\mu\text{m}$ ) ; le bleu (0,45 à 0,49  $\mu\text{m}$ ) ; le vert (0,49 à 0,58  $\mu\text{m}$ ) ; le jaune (0,58 à 0,60  $\mu\text{m}$ ) ; l'orange (0,60 à 0,62  $\mu\text{m}$ ) et le rouge (0,62 à 0,80  $\mu\text{m}$ ). La superposition de deux des trois couleurs primaires (bleu, vert, rouge) donne une couleur secondaire (cyan = vert + bleu ; magenta = rouge + bleu ; jaune = vert + rouge). La superposition des trois couleurs primaires donne du blanc. Inversement la superposition de deux couleurs secondaires donne une couleur primaire (bleu = cyan + magenta ; vert = cyan + jaune ; rouge = magenta + jaune). La superposition des trois couleurs secondaires donne du noir.

La plus ancienne source de lumière visible que l'humanité ait connue est naturellement le Soleil. Nos ancêtres du paléolithique (allant de  $-300\ 000$  à  $-12\ 000$  ans) ont découverts et utilisés le feu. Les Grecs et

les Romains s'éclairaient grâce à la lampe à huile. La bougie est apparue au Moyen-Âge. C'est au début de la « seconde révolution industrielle » (1860), que les lampes au gaz ou au pétrole ont été introduites et éclairaient en particulier les rues. La lampe à incandescence d'Edison a permis, à partir du milieu des années 1880, de disposer de sources lumineuses électriques domestiques. Depuis, le progrès n'a cessé de se poursuivre, avec en particulier, les tubes fluorescents et autres lampes halogènes. La prochaine révolution est pour bientôt. La lumière émise par les écrans de téléphones portables utilise des composants semi-conducteurs (en particulier des diodes électroluminescentes (DEL) blanches, introduites en 2000). Des sources de lumières planes, de grande dimension et à fort rendement se profilent à l'horizon. Elles reproduiront une lumière très proche de celle du soleil et bouleverseront les éclairages traditionnels (ce qui aura sans doute une incidence sur l'architecture interne des bâtiments). Il faut également signaler l'apparition de sources de lumière souples (car extrêmement fines) en plastique, qui sont déjà utilisées actuellement dans certains système d'affichage de faible dimension (autoradio, rasoir, etc.).

Le premier détecteur visible a naturellement été l'œil. La première photographie date de 1827. Elle s'améliore suffisamment en près

### Les premières photographies

C'est Niepce qui réalise le premier négatif photographique sur papier de l'histoire. Le 5 mai 1816, il écrit : « *Le fond du tableau est noir, et les objets sont blancs, c'est-à-dire plus clairs que le fond* » (!). Il ajoute : « *La possibilité de peindre de cette manière, me paraît à peu près démontrée* ». Mais le négatif n'est pas stable ; il continue à noircir quand on le regarde à la lumière. C'est en 1822, qu'il obtient une image négative permanente. La plus ancienne photo au monde, qui nous soit parvenue, date de 1827 (point de vue du Gras) et a également été réalisée par Niepce. En 1829, Niepce, qui a alors 64 ans, engage une association avec Louis Daguerre. Le procédé mis au point par Daguerre, et reposant en partie sur les travaux de Niepce, permet de réduire les temps de pose à 30 minutes et d'atteindre une qualité « picturale ». Il est divulgué en 1839 sous le nom de daguerréotype (Niepce est mort en 1833). Arago fait acheter ce procédé par le gouvernement français afin d'en « doter libéralement le monde entier ». Signalons que c'est un autre grand physicien, James Clerk Maxwell, qui réalise en 1861 la première photographie en couleur. À la fin des années 1880, apparaît le « celluloid », permettant de réaliser les premiers films sur pellicule transparente, ainsi que le conditionnement en bobines (1888) par George Eastman.

Les diodes électroluminescentes (DEL) sont largement utilisées. Elles sont employées dans l'éclairage des tableaux de bord des voitures et on les trouve, de plus en plus souvent, dans les feux tricolores. Le feu rouge, par exemple, est alors constitué d'une multitude de DEL rouge, ce qui présente au moins, deux avantages : meilleur rendement, donc plus faible consommation, maintenance plus facile et moins fréquente. Même si une DEL s'éteint, il reste toutes les autres.

de 70 ans pour permettre les toutes premières projections cinématographiques en 1895. Les détecteurs photoélectriques (c'est-à-dire utilisant l'effet photoélectrique) voient le jour dans les années 1910. Quant au tube cathodique (inventé par Braun en 1897), il évolue rapidement et permet les premiers essais de télévisions électroniques au début des années 1930. L'apparition des semiconducteurs a permis de réaliser, à partir des années 1950, des détecteurs ponctuels solides (photodiodes et phototransistors). Un nouveau type de détecteur fait son apparition à la fin des années 1970, il sera à l'origine d'une véritable révolution. Il s'agit des CCD (*Charge Coupled Devices*, ou en français, Dispositif à transfert de charge) qui sont de véritables pupilles électroniques. Ces dispositifs, d'abord utilisés en astronomie (ils remplacent les plaques photographiques et les films), se développent bientôt dans le grand public. On les trouve d'abord dans les caméscopes, puis l'amélioration de leurs performances et la réduction de leur coût permettent de faire des appareils photo numériques, des caméscopes miniatures. On les trouve même maintenant, dans les téléphones portables proposant la fonction photo et même vidéo !

## *L'ultraviolet*

Le rayonnement ultraviolet (UV) ne couvre qu'une très faible partie du spectre s'étendant de  $0,4 \mu\text{m}$  ( $750 \text{ THz}$ ) à  $400 \text{ nm}$  ( $75 \text{ PHz}$ )<sup>5</sup>. Depuis le Congrès de Copenhague de 1932, on le subdivise en trois domaines : les UV A ( $4000\text{--}3150 \text{ \AA}$ )<sup>6</sup>; les UV B ( $3150\text{--}2800 \text{ \AA}$ ) et les UV C ( $\lambda < 2850 \text{ \AA}$ ). La limite de transmission (domaine de transparence UV) dépend des matériaux. Le verre ordinaire est transparent aux UV au-delà de  $3200 \text{ \AA}$  ; l'atmosphère au-delà de  $2950 \text{ \AA}$  ; le quartz au-delà de  $1850 \text{ \AA}$  ; l'air (à cause de l'oxygène) au-delà également de  $1850 \text{ \AA}$  et la fluorine au-delà de  $1200 \text{ \AA}$ . Il n'est donc pas facile de faire de l'optique UV, surtout vers les faibles longueurs d'onde, car cela exige un choix drastique des matériaux pouvant être utilisés. Comme l'air devient opaque en dessous de  $1850 \text{ \AA}$ , il faut à partir de là, réaliser les expériences dans le vide ! En astronomie spatiale (donc dans le vide), on explore également le ciel en UV Extrême ( $1200\text{--}40 \text{ \AA}$ ). Tous les matériaux étant opaques à ces longueurs d'onde, on utilise une optique par réflexion (optique dite « catoptrique »).

La détection des UV se fait de différentes façons. Les détecteurs photoélectriques sont utilisés de  $0,4 \mu\text{m}$  ( $4000 \text{ \AA}$ ) à  $0,1 \mu\text{m}$  ( $1000 \text{ \AA}$ ) (photocathode en CsI ( $0,1$  à  $0,2 \mu\text{m}$ ) ; photocathode en RbTe ( $0,2$  à

<sup>5</sup>  $1 \text{ PHz} = 1000 \text{ THz} = 10^{15} \text{ Hz}$ .

<sup>6</sup> Dans cette gamme, on utilise souvent comme unité de longueur l'Angström ( $\text{\AA}$ ).  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$ .

0,3  $\mu\text{m}$ ) ; photocathode en SbKCs (0,3 à 0,4  $\mu\text{m}$ ). On peut également utiliser les CCD (qui doivent alors être amincies par l'arrière) ; des détecteurs solides (AlGaN) et même des plaques photo (qui détectent jusqu'à 500  $\text{\AA}$ , soit 0,05  $\mu\text{m}$ ).

## Les ondes « particulières »

---

### *Présentation*

Lorsque l'on descend encore plus bas en longueur d'onde on trouve les rayons X et les rayons gamma ( $\gamma$ ). Il n'y a pas de différence de nature entre les X et les rayons  $\gamma$ . La seule différence est d'origine sémantique : les rayons X ont pour origine des transitions entre couches électroniques, tandis que les rayons  $\gamma$  ont pour origine des transitions entre couches nucléaires. La frontière entre les rayons UV et les rayons X n'est pas très nette, de même que celle entre rayons X et les rayons  $\gamma$ . Disons que, de façon générale, les rayons X ont une longueur d'onde plus grande que les rayons  $\gamma$ . Pour simplifier, nous dirons que les rayons X couvrent la bande allant de 40  $\text{\AA}$  à 0,1  $\text{\AA}$ , tandis que les rayons  $\gamma$ , couvrent la bande allant de 0,1  $\text{\AA}$  à  $10^{-3}$   $\text{\AA}$ . Dans ces domaines, on caractérise plus volontiers le rayonnement par son énergie ( $E$ ), plutôt que par sa longueur d'onde ( $\lambda$ ) ou sa fréquence ( $\nu$ ). Il est d'ailleurs très facile de faire la correspondance grâce à la formule d'Einstein-Planck :  $E = h\nu$  ( $h$  étant la constante de Planck), ou encore  $E = hc/\lambda$  (puisque  $\lambda\nu = c$ ).

### *Les rayons X*

Nous fixerons de façon assez arbitraire, la bande spectrale des rayons X à la région s'étendant de 40  $\text{\AA}$  (soit 3 keV) à 0,1  $\text{\AA}$  (soit  $\sim$  100 keV).

C'est le 8 novembre 1895 précisément, que Röntgen découvre les rayons X. Il les appelle ainsi car ils sont d'origine inconnue. Ce n'est qu'en 1912, que Max von Laue montre leur nature ondulatoire (par l'observation de la diffraction). De son côté, Maurice de Broglie vérifie que les rayons X entraînent, comme les UV, l'effet photoélectrique. En 1914, Karl Siegbahn réussit à faire la spectroscopie de ces rayons, comme on fait de la spectroscopie optique. De plus, en 1925, il découvre qu'ils peuvent être réfractés. Toutes ces propriétés font bien de ces rayons X, des ondes. Toutefois, en 1922, Compton découvre l'effet qui portera son nom et qu'Einstein interprétera comme une collision entre un photon X (représentant l'aspect corpusculaire de la lumière) et un électron. Ce sont finalement les rayons X qui ont fait admettre aux

physiciens la double nature ondulatoire et corpusculaire de la lumière. On utilise d'ailleurs, ce double aspect : il est possible de réfléchir les rayons X (le plus facile, est de le faire en incidence rasante). C'est ainsi que l'on fait de véritables télescopes à rayons X qui, envoyés dans l'espace permettent d'obtenir une image en rayons X du ciel. Le satellite XMM (*X rays Multi Mirror*) de l'Agence Spatiale Européenne, est le premier télescope à rayons X de grande taille qui ait été envoyé dans l'espace. De même, il est possible de faire des lasers à rayons X. Le fait que les rayons X soient pénétrants (et ce d'autant plus que leur longueur d'onde est faible) est une manifestation de leur caractère corpusculaire, dans ce sens où une onde est assez facilement réfractée ou réfléchi, ce qui n'est pas le cas pour les rayons X.

### *Les rayons $\gamma$*

Nous fixerons, également de façon assez arbitraire, la bande spectrale des rayons  $\gamma$  à la région s'étendant de  $0,1 \text{ \AA}$  (soit  $100 \text{ keV}$ ) à  $10^{-4} \text{ \AA}$  (soit  $\sim 100 \text{ MeV}$ ). En réalité, il n'y a pas vraiment de limite vers les hautes énergies. Un gamma télescope embarqué sur un satellite comme CGRO (*Compton Gamma Ray Observatory*) peut détecter des rayons gamma atteignant les  $100 \text{ GeV}$ . Au-delà, dans le domaine baptisé VHE (*Very High Energy*) allant de  $100$  à  $10\,000 \text{ GeV}$  ( $10 \text{ TeV}$ ), les rayons  $\gamma$  sont suffisamment pénétrants pour être détectés depuis la terre. Des énergies encore plus colossales forment le domaine des UHE (*Ultra High Energy*). Elles couvrent la gamme allant de  $10 \text{ TeV}$  à plus de  $100 \text{ TeV}$ .

L'aspect ondulatoire des rayons gamma est presque imperceptible, mais il existe. Des techniques dont la description sortirait du cadre de cet ouvrage, permettent de réaliser des télescopes gamma et donc, d'obtenir des images  $\gamma$  du ciel. L'intérêt en astrophysique est très important, en particulier dans le cadre des observations des « sursauts gamma », dont l'origine, encore assez mystérieuse, pourrait nous renseigner sur des mécanismes physiques passionnants.

Par ailleurs, depuis plusieurs dizaines d'années, des chercheurs essaient de réaliser un laser gamma. Bien que théoriquement possible, des difficultés physiques et techniques extraordinaires rendent un tel objectif encore très ambitieux.

Les rayons  $\gamma$  sont extrêmement pénétrants. Comme pour les rayons X, ceci est une manifestation de leur caractère corpusculaire, dans ce sens où, à l'inverse, une onde est assez facilement réfractée ou réfléchi.

## Conclusion

---

Nous voici donc au terme de notre voyage dans le monde extrêmement riche des ondes électromagnétiques. Il nous a fait parcourir un long chemin, allant des ondes ELF débutant à une fréquence de 30 Hz aux rayons gamma UHE pouvant dépasser l'énergie de 100 TeV (soit une fréquence d'environ  $3 \times 10^{28}$  Hz !) Cela couvre 27 décades. En reprenant notre image temporelle qui nous a déjà servie, il y a entre 30 Hz et  $3 \times 10^{28}$  Hz, le même rapport qu'entre une seconde et un milliard de fois l'âge de l'Univers. Le plus extraordinaire est que cette immense gamme forme un continuum dont chaque parcelle a été explorée et le sera encore pendant longtemps. Outre les applications pratiques et très nombreuses dont seule une petite partie a été évoquée, cette immense fenêtre spectrale nous permet de découvrir notre Univers et nos origines. Il n'est pas moins surprenant de penser que d'autres fenêtres, non électromagnétiques cette fois, commencent à nous permettre d'explorer notre monde d'une autre façon. Il en est ainsi de l'exploitation des ondes gravitationnelles à des fins astrophysiques. Les interféromètres terrestres actuels (LIGO, VIRGO, etc.) et les futurs interféromètres spatiaux (LIGA) sont autant d'observatoires à ondes gravitationnelles. De même, les particules si furtives que sont les neutrinos ouvrent une nouvelle voie d'observation. Des détecteurs comme Superkamiokande, peuvent être considérés comme de véritables observatoires « neutriniques ». Une première « image en neutrino » a d'ailleurs, déjà été réalisée grâce à ces détecteurs. Le chemin parcouru depuis Édouard Branly est immense, mais la curiosité scientifique, la passion, la volonté de précision, la tenacité, la remise en cause des résultats acquis, sont toujours les principes qui animent les chercheurs. En ce sens, des savants comme Branly doivent toujours nous servir de guide, et la connaissance de leurs réussites comme de leurs échecs, de leurs instants de découragement comme de leurs moments d'exaltation doivent être présents à l'esprit et entretenir notre foi dans la recherche tant appliquée que fondamentale. La foi de Branly était également religieuse, au soir de sa vie il écrivait : « *La science est un effort vers la Création, la religion est un effort vers le Créateur* ».





# Liste des noms cités

---

## A

d'Almeida, Charles (1822-1880)

Alhazen (965-1039)

Amagat, Émile Hilaire (1841-1915)

Ampère, André Marie (1775-1836)

Arago, François (1786-1853)

d'Arsonval, Arsène (1851-1940)

## B

Barthélemy, René (1889-1954)

Bartholin, Erasmus (1625-1698)

Belin, Eugène (1876-1963)

Bell, Alexander Graham (1847-1822)

Biot, Jean-Baptiste (1774-1862)

Boltzmann, Ludwig (1844-1906)

Bragg, William Henry (1862-1942)

Bragg, William Lawrence (1890-1971)

Branly, Edgar (1851-1900)

Branly, Édouard (1844-1940)

Branly, Élisabeth (1889-1972)

Branly, Étienne (1885-1953)

Branly, Jeanne (1883-1977)

Braun, Ferdinand (1850-1918)

Brogie, Maurice de (1875-1960)

Bunsen, Robert (1811-1899)

## C

de Caraman-Chimay, Elizabeth, comtesse Greffulhe (1860-1952)

Carnot, Lazare (1753-1823)

Carnot, Sadi (1796-1832)

Caselli, Giovanni (1815-1891)

Cauchy, Augustin Louis (1789-1857)

Chappe, Abraham (1773-1849)

Chappe, Claude (1763-1805)

Chappe d'Auteroche, Jean (1722-1769)

Chappe, Ignace (1762-1829)

Chappe, Pierre François (1765-1834)

Chappe, René (1769-1854)

Copernic, Nicolas (1473-1543)

Cornu, Alfred (1841-1902)

Coty, François (1874-1934)

Coulomb, Charles (1736-1806)

Crookes, William (1832-1919)

Curie, Pierre (1859-1906)

Curie, Marie (1867-1934)

## D

Daguerre, Louis (1787-1851)  
Davy, Humphrey (1778-1829)  
Du Fay, Charles (1698-1739)  
Dumas, Jean-Baptiste (1800-1884)

## E

Edison, Thomas Alva (1847-1931)  
Einstein, Albert (1879-1955)  
Elizabeth, reine de Belgique (1876-1965)  
Estaunié, Édouard (1862-1942)  
Euclide (330-270 av. J.-C.)  
Euler, Leonhard (1707-1783)

## F

Faraday, Michael (1791-1867)  
Fizeau, Hippolyte (1819-1896)  
Fleming, John Ambrose (1849-1945)  
Fontaine, Hippolyte (1833-1910)  
Foucault, Léon (1819-1868)  
Franklin, Benjamin (1706-1790)  
Fraunhofer von, Joseph (1787 – 1826)  
Fresnel, Augustin (1788-1827)

## G

Galilée (1564-1642)  
Galvani, Luigi (1737-1798)  
Gauss, Carl Friedrich (1777-1855)  
Gernez, Jean-Baptiste (1834-1910)  
Gilbert, William (1544-1603)  
Goldstein, Eugen (1859-1930)  
Gramme, Zénobe (1826-1901)  
Gray, Stephen (1666-1736)  
Grimaldi, Francesco Maria (1618-1663)  
Guericke, Otto von (1602-1686)

## H

Hallwachs, Wilhelm (1859-1922)  
Hamilton, Sir William Rowan (1805-1865)

Hauksbee, Francis (1666-1713)  
Hausmann, Georges (1809-1891)  
Haüy, René-Just (1743-1822)  
Heaviside, Oliver (1850-1925)  
Helmholtz, Hermann von (1821-1894)  
Hermite, Charles (1822-1901)  
Herschel, William (1738-1822)  
Hertz, Heinrich (1857-1894)  
Hittorf, Johann (1824-1914)  
Hülsmeier, Christian (1881- 1957)  
Huygens, Christiaan (1629-1695)

## I

Iffla, Daniel (1825-1907)

## J

Janet, Paul (1863-1937)

## K

Kelvin : Voir William Thomson  
Kepler, Johannes (1571-1630)  
Kessler, Franz (1580-1650)  
Kirchhoff, Gustav (1824-1887)  
Kron, Arthur (1870-1945)

## L

Lagrange, Joseph Louis (1736-1813)  
Laplace, Pierre Simon (1749-1827)  
de Lapparent, Albert Auguste (1839-1908)  
Laue, Max von (1879-1960)  
Lavoisier, Antoine Laurent (1743-1794)  
Lemoine, Georges Clément (1841-1922)  
Lenard, Philipp (1862-1947)  
Leeuwenhoek, Antoine (1632-1723)  
Lenard, Philipp (1862-1947)  
Lissajous, Antoine (1822-1880)  
Lodge, Oliver (1851-1940)  
Lorentz, Hendrick Antoon (1853-1928)

## M

Malus, Étienne (1775-1812)  
Marconi, Guglielmo (1874-1937)  
Maxwell, James Clerk (1831-1879)  
Millikan, Robert (1868-1953)  
Mittag-Leffler, Gösta (1846-1927)  
Monge, Gaspard (1746-1818)  
Morse, Samuel (1791-1872)  
Musschenbroek, Petrus Van (1692-1761)

## N

Newton, Isaac (1642-1727)  
Niepce, Nicéphore (1765-1833)  
Nipkow, Paul (1860-1940)  
Nollet, Jean (abbé) (1700-1770)

## O

Ohm, Georg Simon (1789-1854)  
Oersted Hans Christian (1777-1851)

## P

Perrin, Jean (1870-1942)  
Planck, Max (1858-1947)  
Plücker Julius (1801-1868)  
Poggendorff, Johann Christian (1769-1877)  
Poincaré, Henri (1854-1912)  
Poisson, Siméon Denis (1781-1840)  
Popoff, Alexandre (1859-1906)  
Porta, Giambattista della (1538-1615)

## R

Regnault, Henri Victor (1810-1878)  
Righi, Augusto (1850-1920)  
Ritter, Johann (1776-1810)

Römer, Olaüs (1644-1710)  
Röntgen, Wilhelm (1845-1923)  
Roosevelt, Franklin Delano (1882-1945)  
Roosevelt, Sara Delano (1854-1941)  
Ruhmkorff, Heinrich (1803-1877)

## S

Savart, Felix (1791-1841)  
Siegbahn, Karl (1886-1978)  
Siemens, Werner von (1816-1892)  
Snell, Willebrod (1591-1626)  
Stoney, George Johnstone (1826-1911)

## T

Thalès de Milet (625-548 av. J.-C.)  
Thomson, William (1824-1907)  
Thomson, Joseph John (1856-1940)  
Tissot, Camille (1868-1917)

## V

Volta, Alessandro (1745-1827)

## W

Weber, Joseph (1919-2000)  
Wheatstone, Charles (1802-1875)  
Wimshurt, James (1832-1903)  
Wollaston, William (1766-1828)

## Y

Young, Thomas (1773-1829)

## Z

Zeeman, Pieter (1865-1943)  
Zworykin, Vladimir (1899-1982)



# Bibliographie succincte

---

- Le livre : *Édouard Branly et la T.S.F.*, Gabriel Pelletier et Jean Quinet, Éd. Seghers, collection « Savants du monde entier » (1962), co-écrit par l'un des assistants (Gabriel Pelletier) d'Édouard Branly. C'est un témoignage vécu des travaux de notre savant.
- La communication à l'Académie des sciences de Robert Gabillard et Ladislav Raczky : « *Sur une explication possible de l'effet Branly* », permet d'appréhender les recherches post 1960, faites dans ce domaine.
- La thèse de Georges Salmer : « *Étude expérimentale et théorique du phénomène de cohérence dans les milieux métalliques à l'état pulvérulent* », Lille (1966), retrace l'histoire des travaux antérieurs. Cet ouvrage donne une excellente base de référence et propose un modèle qui prolonge celui du Professeur Gabillard.
- L'article de Guy Giraud et Rolland Faure (Université de Provence et C.N.R.S.) : « *Du cohéreur à la science des milieux granulaires* », Revue d'histoire des sciences, 1993 (XLVI/1). Cet article donne une vue synthétique du problème et contient une bibliographie très pertinente.
- Le livre : *Branly au temps des ondes et des limailles*, Philippe Monod-Broca (Postface de Jean Cazenobe), Éd. Belin, collection « Un savant, une époque » (1999). Ce livre est non seulement une excellente

biographie, très précise, de Branly, mais elle intègre également une longue postface (de près de 50 pages), rédigée par Jean Cazenobe (Directeur de recherche au CNRS) sur « Les énigmes de l'effet Branly ».

- Deux excellents articles parus récemment dans le bulletin de la Société Française de Physique : « *Propriétés électriques de la matière granulaire : l'effet Branly continu* », Eric Falcon et Bernard Castaing, bulletin N° 148 (mars 2005) et « *Propriétés électriques de la matière granulaire : bruit et intermittence* », Eric Falcon, Bernard Castaing et Mathieu Creyssels, bulletin N° 149 (mai 2005). Ces deux articles font un point très actualisé des recherches actuelles et de leurs implications.

# Remerciements

---

Je tiens à remercier Étienne Guyon, ancien Directeur de l'École Normale Supérieure et Président de la Société Française de Physique, qui m'a fait l'honneur de préfacer ce livre et à qui je suis redevable de précieuses remarques.

Marion Tournon Branly m'a apporté un soutien constant. Grâce à elle, j'ai pu en quelque sorte, par son témoignage irremplaçable, entrer dans l'intimité d'Édouard Branly, son grand-père, et consulter avec émotion les archives familiales. Je remercie également André Tournon qui a accepté de relire le manuscrit et qui, par ses remarques judicieuses et précises, l'a enrichi.

Je veux également remercier Christine Blondel, spécialiste de l'histoire de l'électricité, qui m'a fait bénéficier de sa très grande expertise et de ses éclaircissements qui ont élargi mes connaissances.

Je souhaite aussi remercier vivement mon épouse pour ses relectures et ses suggestions fort utiles ainsi que pour son soutien moral.

Enfin, je remercie les Éditions *EDP Sciences* pour leur aide, leur réactivité et leur détermination.

## *Crédits photographiques*

Toutes les photographies et dessins d'Édouard Branly (intérieur et couverture) sont la propriété de la famille Branly.

- p. 56, portrait Lagrange : © Archives de l'Académie des sciences
- p. 61, portrait Biot : © Archives de l'Académie des sciences
- p. 62, démonstration Volta : © droits réservés
- p. 65, portrait Ampère : © musée Ampère
- p. 76, roue dentée : © École Polytechnique
- p. 88, palais de l'Électricité : © Conservatoire numérique des Arts & Métiers
- p. 108, portrait Poincaré : © École Polytechnique
- p. 148, récepteur télévision 1937 : © droits réservés
- p. 174, Arecibo : © Nasa
- p. 177, lasers à cascade quantique : © Thales Research & Technology