

Chaire de Physique appliquée à l'Histoire naturelle

Professeur Monsieur JEAN BECQUEREL



A.-C. BECQUEREL

E. BECQUEREL



H. BECQUEREL

Les principaux travaux des Professeurs de la Chaire de Physique du *Muséum National d'Histoire naturelle*

Par JEAN BECQUEREL

Antoine-César BECQUEREL, ancien élève de l'École Polytechnique, chef de bataillon du génie, abandonna la carrière militaire à l'âge de vingt-sept ans (1815) pour se consacrer uniquement aux sciences. Son œuvre, fruit d'un travail ininterrompu de soixante années, est considérable.

Les premières recherches d'Antoine-César BECQUEREL se rapportent à la Minéralogie (1819) : il fut conduit à étudier le dégagement d'électricité par la compression de certaines substances minérales (1820) ; il montra que cet effet, considéré par HAÛY comme une propriété spéciale à quelques minéraux, est une propriété générale de la matière ; il donna les lois du phénomène et établit que, pour de faibles pressions, la quantité d'électricité produite est proportionnelle à la compression exercée. Ce travail, important par lui-même, fut l'origine de ses nombreuses recherches sur l'électricité : il avait, dès lors, trouvé la voie qu'il devait suivre.

Peu après, il étudia les manifestations du magnétisme dans des fils fins et dans différents corps. Dès 1823, il donna les *lois fondamentales des phénomènes thermo-électriques*, toujours enseignées depuis, dans les cours de physique classique, sous le nom de « lois d'A.-C. BECQUEREL » ; il signala bientôt (1826) l'application des courants thermo-électriques à la détermination des températures élevées. Puis il imagina un instrument précieux, le *galvanomètre différentiel* (1825), destiné à comparer les conductibilités électriques des métaux.

A la même époque (1823), le principal objet de ses efforts fut l'étude du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques ; car la question fondamentale des origines de la production de l'électricité était alors très discutée. Même avant les découvertes de GALVANI et de VOLTA, on avait observé que certaines actions chimiques sont accompagnées d'un

dégagement d'électricité : c'est ainsi que, dès 1781, LAVOISIER et LAPLACE avaient chargé un condensateur en le mettant en communication avec un vase où l'on faisait agir de l'acide sulfurique sur de la craie ou sur du fer ; mais ils avaient attribué l'électricité dégagée au changement d'état des corps (production de vapeur), et d'ailleurs les effets étaient tellement complexes qu'aucune loi n'avait pu être formulée. D'autre part, des savants éminents, tels que DAVY, soutenaient que le contact de deux métaux différents était la seule cause de la production d'électricité dans la pile voltaïque.

C'est Antoine-César BECQUEREL qui démontra, par des expériences ingénieuses et originales, le dégagement constant de l'électricité dans les réactions mutuelles des corps ; il formula la loi suivante :

Quand deux corps se combinent, les substances qui s'unissent à l'oxygène ou celles qui jouent le rôle de base s'électrisent négativement, tandis que l'oxygène ou les corps qui jouent le rôle d'acide s'électrisent positivement. Dans les décompositions, les manifestations électriques sont inverses.

A.-C. BECQUEREL établit alors l'*origine chimique du dégagement de l'électricité dans la pile*, vérité devenue banale, mais à laquelle il convient de rattacher le nom de l'auteur de la découverte.

Ses travaux sur la pile de VOLTA le conduisirent, en 1829, à reconnaître la cause de l'affaiblissement du courant dans les piles simples. Traduisant sa découverte en invention, il créa la *pile à deux liquides* et notamment la *pile à sulfate de cuivre*. Voici quelques passages de son Mémoire (p. 23 du tome XLI des *Ann. de chimie et de physique*) :

« La pile porte avec elle les causes de diminution qu'éprouve continuellement l'intensité du courant électrique, car, dès l'instant qu'elle fonctionne, il s'opère des décompositions et des transports de substances qui polarisent les plaques de manière à produire des courants en sens inverse du premier : l'art consiste à dissoudre ces dépôts à mesure qu'ils se forment avec des liquides convenablement placés. On y parvient à l'aide du procédé que j'ai décrit ; ainsi, dans l'expérience n° 5, l'acide sulfurique qui est dans la case cuivre est employé en partie à dissoudre une portion du zinc qui est transporté sur la plaque de cuivre... Le maximum d'intensité s'obtient sensiblement quand le cuivre plonge dans une dissolution de nitrate de cuivre, et le zinc dans une dissolution de sulfate de zinc... Une pile construite suivant les principes que je viens de faire connaître, c'est-à-dire dans laquelle chaque métal plonge dans une case particulière qui renferme un liquide convenable, cette pile, dis-je, réunit toutes les conditions les plus favorables, puisqu'on évite ainsi les causes qui peuvent nuire aux effets électriques... »

Le sulfate de cuivre fut aussi souvent employé que le nitrate. Cette pile, appelée alors *pile cloisonnée*, rendit dans les laboratoires et dans l'industrie des services considérables, et, plus tard, elle seule permit les premières applications des courants électriques à la télégraphie.

En 1836, sept ans après la découverte de la *pile à courant constant*, le physicien anglais DANIELL reproduisit, sans même les citer, les raisonnements et les expériences d'A.-C. BECQUEREL. L'habitude fut prise de désigner sous le nom de DANIELL une pile que ce physicien n'avait pas inventée, qu'il avait seulement améliorée au point de vue de la

construction. Lorsque A.-C. BECQUEREL voulut protester contre cette injustice, il se trouva désarmé devant une habitude déjà établie ; il eut la douleur de ne pouvoir baptiser l'un des plus précieux instruments de la physique et de voir son œuvre porter, même en France, un nom étranger.

Toute la théorie des piles à courant constant est renfermée dans le Mémoire de 1829. En 1835, A.-C. BECQUEREL inventa une pile à grande force électromotrice, la *pile à oxygène*, formée avec de la potasse et de l'acide nitrique, et, en 1846, il construisit la première pile à chlorure d'argent.

Signalons, en passant, l'invention de la balance électromagnétique (1837) destinée à mesurer les intensités des courants électriques.

Il est impossible d'entrer ici dans le détail des recherches d'A.-C. BECQUEREL sur le dégagement de l'électricité. Dans ses mémoires, il s'élève à une hauteur de vues remarquable. Il développe l'idée de l'unité d'origine de la chaleur, de la lumière, de l'électricité et de la transformation de ces trois formes d'énergie les unes dans les autres. Son nom reste attaché à cette grande vérité que, pour la production de l'électricité, il faut toujours un travail moléculaire, soit mécanique (frottement, pression), soit physique (chaleur, lumière), soit chimique (combinaisons et décompositions).

Ayant doté la science de la pile à courant constant, A.-C. BECQUEREL se hâta de l'utiliser pour obtenir des décompositions électro-chimiques. Il créa des méthodes inattendues, remarquables par leur extrême simplicité, à l'aide desquelles il montra comment diverses substances, même réputées insolubles, sont lentement attaquées par les acides : ces actions mettent en jeu des courants électriques, qui sont parfois très faibles, mais qui peuvent avec le temps donner naissance, en traversant les liquides, à des composés cristallisés, identiques à ceux qu'on rencontre dans la nature. Imiter et reproduire les phénomènes naturels, tels furent, en effet, la préoccupation constante de sa vie et le but de ses efforts.

Vers la même époque (1833), il étudia aussi les phénomènes électriques qui prennent naissance à l'intérieur des végétaux, les altérations qui se produisent à la surface du sol et dans la terre, la décomposition des roches. Dans un voyage à Venise, il étudia l'électricité de la torpille et la phosphorescence de la mer. Il fit usage des méthodes thermo-électriques, qu'il avait imaginées et perfectionnées, pour déterminer la température des tissus et des liquides des végétaux et des animaux, la température du corps humain dans les plaines et au sommet du grand Saint-Bernard. Il détermina la température de la terre à diverses profondeurs et celle du fond des lacs.

Cet ensemble de recherches eut un retentissement considérable. Les premières applications de l'électricité à l'histoire naturelle et à la physique du globe attirèrent l'attention du monde savant et firent comprendre que *la physique expérimentale peut apporter une aide précieuse à d'autres sciences*. Aussi, en 1838, les professeurs du Muséum demandèrent-ils au gouvernement la création d'une chaire de Physique appliquée aux sciences naturelles, et l'enseignement fut confié à celui qui avait ouvert tant d'horizons nouveaux dans cette voie. Le nouveau professeur résolut de porter ses efforts sur les applications de la physique à diverses branches de l'histoire naturelle : il se proposa, en particulier, d'étudier les

transformations des minéraux et des roches et le développement de la matière organique animale ou végétale.

L'œuvre accomplie en vingt ans, jusqu'en 1838, suffirait à remplir la carrière d'un savant ; elle n'était cependant qu'une étape dans la vie d'A.-C. BECQUEREL. Pendant quarante ans encore, au Muséum, il ne cessa d'accumuler travaux sur travaux, et chaque année vit paraître quelque découverte. Il poursuivit ses recherches sur la température des tissus organiques de l'homme et des animaux, du sang artériel et du sang veineux (1841) ; il reconnut l'existence de courants électriques entre des terrains de diverses natures et étudia leur influence sur les phénomènes de décomposition et de recomposition dans la terre (1844-1845) ; il publia un travail sur les manifestations électriques qui accompagnent la contraction des muscles (1849) ; il étendit encore ses expériences d'électrochimie, tantôt avec des végétaux (1850-1851), tantôt avec des métaux et des sels minéraux ; il découvrit les *courants pyro-électriques* entre les métaux et les sels en fusion et imagina des méthodes métallurgiques nouvelles fondées sur des réactions électro-chimiques. A cet ensemble de recherches se rattachent le procédé de traitement qu'il a découvert pour les minerais d'argent, les procédés par lesquels on effectue des dépôts épais, continus et malléables de nickel et de cobalt sur d'autres métaux qu'il s'agit de préserver de l'oxydation, enfin les méthodes par lesquelles on peut déposer les peroxydes de plomb, de fer, de manganèse, pour obtenir les colorations les plus variées ; ces découvertes ont été appliquées en grand dans l'industrie, et la passementerie en a tiré de brillants effets.

Il convient de consacrer quelques lignes à la description du *thermomètre électrique* de A.-C. BECQUEREL. Considérons un circuit formé par deux fils de longueurs égales réunis et soudés à leurs extrémités : l'un des fils est en fer et l'autre en cuivre ou en platine. L'une des soudures, qui est généralement en forme d'*aiguille*, est placée en un point d'accès difficile, dont on veut connaître la température, par exemple dans le sol, ou dans les tissus des êtres vivants ; l'autre soudure est à la disposition de l'observateur, qui peut en faire varier à volonté la température et déterminer celle-ci avec un thermomètre ordinaire : on place cette soudure dans un godet rempli de mercure où plonge un thermomètre. Si les deux jonctions des fils sont à des températures différentes, un galvanomètre intercalé dans le circuit révèle un courant thermo-électrique ; mais si, en réchauffant ou refroidissant la soudure qui est à notre disposition, nous annulons le courant, nous pouvons affirmer qu'à ce moment les deux extrémités des fils sont à la même température, et sur le thermomètre plongé dans le mercure nous pouvons lire la température du point inaccessible.

A.-C. BECQUEREL déterminait ainsi les températures à un centième de degré près. Cette méthode de compensation, d'un emploi aisé et d'une grande précision, fut appliquée d'abord à étudier les variations de la température de l'air près et loin des arbres, aux diverses époques de l'année, puis de la température du sol depuis la surface jusqu'à une profondeur de 36 mètres, dans deux terrains couverts l'un de sable, l'autre de gazon (1864 à 1870). Les observations, continuées au Muséum jusqu'en 1914, ont donné des renseignements d'un grand intérêt sur la propagation de la chaleur dans la terre, ainsi qu'on le verra plus loin (Henri BECQUEREL).

Les recherches météorologiques tiennent une grande place dans l'œuvre d'A.-C. BEC-

QUEREL. Il étudia la répartition en France des averses de grêle : ayant dressé la statistique des sinistres, d'après les registres des compagnies d'assurance, pour le Loiret et les départements limitrophes, il montra que les grains accompagnés de grêle suivent généralement les mêmes parcours : *une forêt* (comme la forêt d'Orléans) *arrête les grains ou les divise et protège le pays situé au delà*. Ces conclusions le conduisirent à étudier, en collaboration avec son fils Edmond, les quantités de pluie près et loin des bois, à démontrer *l'influence néfaste du déboisement sur le régime des rivières*, et plus généralement à indiquer le rôle climatérique des forêts (1865-1869).

Cependant, il n'abandonnait pas les questions électro-chimiques ; il publiait, en 1862, un travail sur la galvanoplastie du nickel et du cobalt (en collaboration avec son fils), puis un mémoire sur la conservation du fer et du blindage en cuivre des navires dans l'eau de mer (1864-1867).

Enfin, en 1867, A.-C. BECQUEREL fit une nouvelle et importante découverte. Un tube fermé à sa base renfermant une solution d'un sel de cuivre était plongé dans une solution de monosulfure de sodium ; ce tube s'étant fêlé, il ne se produisit pas de sulfure par le mélange des solutions, mais la fêlure se recouvrit peu à peu de cristaux de cuivre. A.-C. BECQUEREL vit que ce phénomène était dû à des effets électriques dont il donna bientôt la théorie et qu'il appela *électro-capillaires*. Pendant les dix dernières années de sa vie, il ne cessa de poursuivre l'étude de ces effets, qui résultent de l'action chimique exercée par deux liquides séparés par une cloison perméable. Dans les espaces capillaires d'une fêlure de verre, entre deux plaques planes, ou encore à travers une colonne d'argile et de sable, il parvint à produire des dépôts de minéraux métalliques ; il expliqua les phénomènes d'endosmose et d'exosmose à travers les membranes et précisa le rôle de l'intervention des forces physico-chimiques dans l'organisme des êtres vivants.

Puis il étudia par les méthodes électriques les questions de dynamique chimique, le rôle de l'eau dans les dissolutions, les décompositions qui résultent des mélanges de dissolutions salines neutres ou alcalines, les forces électromotrices entre les liquides de l'organisme séparés par des membranes semblables aux parois poreuses de ses appareils.

A l'âge de quatre-vingt-sept ans, il réunit l'exposé de tous ces travaux dans un ouvrage intitulé : *Des forces physico-chimiques et de leur intervention dans la production des phénomènes naturels*. Cet ouvrage, absolument original, traite en particulier du rôle que jouent les effets électro-capillaires dans tous les phénomènes de la vie.

Avec une activité surprenante pour son âge, il s'était tenu au courant des travaux les plus récents de thermochimie qui se rattachaient à ses études ; dans sa quatre-vingt-dixième année, il publiait encore un travail sur les rapports entre les forces électromotrices et les quantités de chaleur dégagées par quelques actions électro-capillaires et exposait de nouvelles recherches sur les phénomènes électro-capillaires. Ce furent ses derniers travaux, quelques mois avant sa mort (18 janvier 1878).

Dans cette énumération rapide qui suit à peu près l'ordre chronologique, où la diversité des recherches entreprises simultanément témoigne de la puissance et de la fécondité de son esprit, nous avons dû passer sous silence de nombreux travaux d'A.-C. BECQUEREL relatifs à l'agriculture, à la régénération de la Sologne, et nous n'avons pu parler d'une

vingtaine de volumes publiés sur la physique, la météorologie et diverses questions agricoles.

Alexandre-Edmond BECQUEREL avait été reçu à l'École Normale en 1837 et un an après à l'École Polytechnique, l'année même de la fondation de la chaire de Physique au Muséum, mais il renonça au bénéfice de cette admission pour devenir, à l'âge de dix-huit ans, aide-préparateur de son père, auquel il devait succéder en 1878. Il fut aussi professeur au Conservatoire des Arts et Métiers.

Les travaux d'Edmond BECQUEREL ont donc commencé dès la création de la chaire de Physique. A cette époque, les découvertes de DAGUERRE venaient de donner naissance à la photographie et avaient montré l'importance théorique et pratique des actions chimiques provoquées par la lumière. Comme, d'autre part, A.-C. BECQUEREL poursuivait ses études sur le dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, Edmond BECQUEREL fut logiquement amené à découvrir la production d'électricité dans les changements dus à la lumière. Il étudia le dégagement d'électricité qui se manifeste lorsque des rayons solaires frappent une plaque daguerrienne placée dans un liquide conducteur : la plaque se charge d'électricité positive et le liquide d'électricité négative. Il créa alors l'*actinomètre électro-chimique* : dans une cuve remplie d'eau acidulée plongent deux lames sensibles communiquant avec un galvanomètre à fil long et fin ; quand la lumière frappe l'une de ces lames, il se produit un courant dont l'intensité donne la mesure de l'action lumineuse. Edmond BECQUEREL fit ce remarquable travail à l'âge de dix-neuf ans (1839-1840).

Cette première découverte fut presque aussitôt suivie par une autre non moins remarquable : la plaque daguerrienne, préparée dans l'obscurité en exposant une lame d'argent à la vapeur d'iode, n'est sensible que pour les radiations les plus réfrangibles du spectre ; Edmond BECQUEREL montra que, si l'on expose pendant quelques secondes la plaque à la lumière diffuse, elle devient sensible aux radiations rouges, jaunes et vertes ; ces rayons *continuent* donc une action commencée par les rayons chimiques. Les rayons continuateurs sont aussi révélateurs, et Edmond BECQUEREL obtint de très beaux daguerréotypes sans mercure, par la seule exposition de la plaque à la lumière transmise à travers un verre, coloré en rouge par de l'oxydure de cuivre (1849).

A cette époque, on croyait généralement à l'existence de trois sortes de radiations distinctes : des rayons calorifiques, des rayons lumineux et des rayons chimiques. Edmond BECQUEREL réalisa une expérience fondamentale : en projetant le spectre solaire sur une plaque sensible, il vit apparaître dans le bleu et le violet les raies sombres de FRAUNHOFER, puis au delà du spectre visible, un grand nombre de raies semblables à celles de la partie visible, dont elles forment la suite : ces raies se reproduisaient identiquement les mêmes, quelle que soit la substance sensible employée, dans toute la partie où cette substance subit l'action de la lumière. La première photographie des raies spectrales était réalisée, et *l'unité de constitution du spectre solaire dans la région visible et la région invisible était démontrée* (1842). Il serait superflu d'insister sur l'importance d'un pareil résultat.

L'emploi d'écrans transparents, colorés ou non, conduisit Edmond BECQUEREL à

montrer que chaque écran absorbe certaines radiations et que toute radiation supprimée comme lumière disparaît en même temps comme agent photochimique, comme cause de phosphorescence et comme cause de chaleur : en un mot, chaque radiation absorbée disparaît à la fois dans toutes ses manifestations, vérité qui nous paraît aujourd'hui évidente, mais qui était encore ignorée en 1840.

Dans une série de recherches poursuivies méthodiquement, de 1838 à 1848, le problème de la *photographie des couleurs* reçut sa première solution. Si l'on dépose sur une lame d'argent une couche de sous-chlorure d'argent violet, soit par décomposition électrolytique d'une solution étendue d'acide chlorhydrique, soit en plongeant la lame dans une solution de bichlorure de cuivre, un spectre lumineux projeté sur cette lame y développe une image colorée, où chaque couleur est bien celle de la lumière qui a impressionné la plaque. L'image apparaît lentement, d'elle-même, à la suite d'une longue pose, sans qu'il y ait lieu de la révéler. Malheureusement, les images très belles ainsi obtenues ne se fixent pas ; le sous-chlorure d'argent, coloré ou non, se dissout dans l'hyposulfite de soude. Ces photographies en couleur se conservent à l'obscurité depuis quatre-vingt-sept ans, mais elles s'altéreraient lentement à la lumière diffuse.

Le sous-chlorure d'argent violet est sensible à tous les rayons lumineux dans les mêmes limites que la rétine. En l'utilisant dans l'actinomètre, on réalise un véritable photomètre électro-chimique.

Parallèlement à ses travaux sur les actions chimiques de la lumière, Edmond BECQUEREL réalisa dans d'autres voies des expériences nouvelles et importantes. En 1843, il étendit aux liquides la loi que JOULE avait établie sur le dégagement de chaleur dans les conducteurs solides parcourus par un courant ; il appliqua dans ces recherches la méthode du galvanomètre différentiel imaginée par son père et inventa un rhéostat à liquide qui est passé dans l'usage.

En 1844, il publia un travail sur les lois qui régissent la décomposition électrolytique des sels à formules complexes et, rectifiant un énoncé de FARADAY, donna la loi fondamentale de l'effet ; le même courant dégage au pôle positif, dans divers électrolytes, la même quantité ou des quantités équivalentes de métalloïde ou d'acide. En 1846, il mesura les pouvoirs conducteurs d'un grand nombre de corps solides et liquides et détermina l'influence de la chaleur sur la conductibilité.

La même année, il fut conduit à d'importantes observations sur la polarisation rotatoire magnétique. FARADAY venait de découvrir la rotation du plan de polarisation de la lumière dans les substances amorphes ou les liquides sous l'action d'un champ magnétique. Edmond BECQUEREL établit que, pour une même substance, le pouvoir rotatoire magnétique varie sensiblement en raison inverse du carré de la longueur d'onde, que les cristaux uniaxes jouissent de la même propriété, dans la direction de l'axe optique, enfin que les solutions aqueuses des sels de fer ont un pouvoir rotatoire magnétique plus faible que celui de l'eau. Ces observations capitales furent la source des principales découvertes ultérieures sur le phénomène de FARADAY, en particulier des travaux d'Henri BECQUEREL *et de ceux qui se poursuivent encore aujourd'hui au laboratoire de physique du Muséum*.

Edmond BECQUEREL s'attacha alors à l'étude du magnétisme (1845 à 1855). Il établit,

J. BECQUEREL

par des expériences nombreuses et variées, que tous les corps subissent, à des degrés différents, l'influence attractive ou répulsive de l'aimant. Il découvrit que l'oxygène est magnétique (on dirait aujourd'hui paramagnétique). Enfin, il établit qu'un corps est repoussé ou attiré par l'aimant suivant qu'il se trouve dans un milieu plus ou moins magnétique que lui.

Entre 1855 et 1861, Edmond BECQUEREL étudia les effets électriques qui se produisent par le mouvement des lames métalliques dans les liquides conducteurs ; il fit des recherches sur les constantes des piles et sur la conductibilité des liquides dans les tubes capillaires. Il convient de signaler surtout un travail très étendu sur la pyrométrie, la détermination des températures élevées par les méthodes thermo-électriques ; puis une étude fondamentale des radiations émises par les corps incandescents : il montre que la température peut se déduire de mesures photométriques ; il trouve que les températures des foyers les plus ardents ne sont pas aussi élevées qu'on le pensait. Les travaux plus récents confirment cette conclusion, et la question de la mesure optique des hautes températures a pris depuis une très grande extension.

Rappelons encore les travaux d'Edmond BECQUEREL sur les pouvoirs thermo-électriques des métaux et de leurs alliages ; la construction de la pile thermo-électrique sulfure de cuivre-maillechoirt qui donne au rouge sombre une force électromotrice de un tiers de volt.

Nous arrivons maintenant aux travaux les plus importants d'Edmond BECQUEREL, à ses découvertes sur la phosphorescence.

On connaissait certains effets de phosphorescence des corps organisés et de quelques minéraux. On avait su préparer quelques substances qui restaient lumineuses après action de la lumière, ou de la chaleur, ou à la suite d'actions mécaniques ; mais, avant 1839, aucune étude systématique de ces phénomènes n'avait été entreprise.

En 1839, A.-C. BECQUEREL s'était occupé de l'action des décharges électriques sur la phosphorescence et, dans un travail fait conjointement avec son fils et avec BIOT, il avait été conduit à étudier la phosphorescence de diverses substances. Edmond BECQUEREL continua seul ces recherches et ne cessa de s'occuper de ces questions pendant toute sa vie.

Quelques physiciens avaient déjà vu que les rayons bleus et violets sont les plus aptes à exciter la phosphorescence de la « pierre de Bologne ». Edmond BECQUEREL, en 1843, montra que, si l'on projette le spectre solaire sur un écran recouvert d'un sulfure phosphorescent, la phosphorescence est provoquée par les régions bleue, violette et ultra-violette : il vit ainsi apparaître les raies sombres du spectre solaire, notamment celles qu'il avait découvertes dans l'ultra-violet par la photographie. Dans certaines régions du spectre, les substances rendues lumineuses acquièrent la faculté de luire encore après extinction de la lumière excitatrice ; dans d'autres régions, l'émission cesse en même temps que l'action du spectre. STOKES a étudié plus tard ces derniers phénomènes sous le nom de fluorescence.

Dans un mémoire paru en 1857, Edmond BECQUEREL décrit les modes de préparation de nombreuses substances phosphorescentes de teintes diverses ; ce sont des sulfures de baryum, de strontium et de calcium. Ces corps doivent leur phosphorescence à des traces de matières étrangères : avec le sulfure de calcium, par exemple, une trace de manganèse

donne des corps lumineux rouges et jaunes, la présence de sels de sodium et de lithium donne des produits lumineux verts et une petite quantité de bismuth avec un peu de sodium donne une matière très lumineuse bleue. Edmond BECQUEREL étudia les régions du spectre qui provoquent la phosphorescence de chacune de ces substances. Il montra aussi qu'en les enfermant dans des tubes à gaz raréfié et faisant passer les décharges d'une bobine d'induction la phosphorescence qui persiste après le passage est très vive.

La durée de l'émission est très variable d'un corps à l'autre ; la phosphorescence de quelques-uns reste visible pendant plusieurs heures (sulfure de calcium bleu) ; d'autres s'éteignent très vite : par exemple, un morceau de spath d'Islande, éclairé en ouvrant un volet dans une chambre noire, reste lumineux pendant un tiers de seconde environ après fermeture du volet. Il convenait donc de réaliser un dispositif permettant de voir d'une manière continue les corps un instant très court après le moment où l'action de la lumière excitatrice avait cessé : Edmond BECQUEREL imagina un remarquable appareil, le *phosphoscope* (1858).

Le principe de l'appareil est le suivant : deux disques sont montés solidairement sur un même axe horizontal ; tous deux sont percés d'ouverture, qui ne se correspondent pas d'un disque à l'autre ; on projette sur l'un des disques un faisceau de lumière horizontal, parallèle à l'axe. Si l'on met les disques en rotation, le faisceau ne traverse pas le système, et un observateur placé de l'autre côté dans le prolongement du faisceau lumineux ne reçoit aucune lumière ; mais si, entre les deux disques et sur le prolongement du faisceau lumineux, on place un corps transparent capable de devenir phosphorescent, ce corps est éclairé chaque fois qu'une ouverture passe du côté de la source de lumière, et, chaque fois qu'une ouverture passe du côté de l'observateur, celui-ci voit le corps en vertu de la lumière qu'il émet. Par suite de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, le corps paraît luire d'une manière continue. Avec un tel appareil, en multipliant les ouvertures de chacun des disques et donnant à ceux-ci un mouvement rapide, il a été possible de réduire jusqu'à un quarante-millième de seconde le temps qui sépare l'excitation lumineuse de l'observation.

La première fois que l'expérience fut faite (avec un dispositif plus rudimentaire que celui qui vient d'être décrit), non seulement les matières phosphorescentes déjà connues parurent lumineuses, mais encore le tube de verre qui les contenait émit une lumière verte ; aussitôt Edmond BECQUEREL plaça dans l'appareil des minéraux et des substances diverses dont la plupart brillèrent de diverses couleurs. Plus court est le temps qui s'écoule entre l'excitation et l'observation, plus grand est le nombre des substances qui deviennent phosphorescentes. Il fut ainsi établi que la phosphorescence était un effet beaucoup plus générale qu'on ne le pensait, et Edmond BECQUEREL avait doté la science d'un appareil précieux pour l'étude de ce phénomène.

Avec le spath d'Islande, la phosphorescence n'est plus sensible au delà de un tiers de seconde ; avec le rubis, elle dure un vingtième de seconde ; pour le nitrate d'uranyle, la durée est de l'ordre de un centième de seconde ; pour les platinocyanures, il n'y a plus de lumière au bout de un trois-millième ou un quatre-millième de seconde ; enfin, d'autres substances, parmi lesquelles il faut ranger tous les liquides luminescents, ont une durée

d'émission tellement courte qu'on n'a pu les observer au phosphoroscope ; ce sont les substances que STOKES a appelées *fluorescentes* ; STOKES pensait qu'il s'agissait d'un nouvel effet lumineux, d'une diffusion avec changement de fréquence de la lumière incidente ; mais Edmond BECQUEREL a montré que le phénomène est de même nature que celui présenté par les corps phosphorescents.

En 1859, Edmond BECQUEREL établit que l'oxygène mélangé à des traces d'autres gaz et raréfié reste lumineux quelques instants après le passage d'une décharge. La même année, il analysa la lumière émise par diverses substances phosphorescentes ; chacune d'elles donne un spectre qui lui est propre, composé de bandes lumineuses plus ou moins fines. Le spectre dépend non seulement de la constitution chimique de la substance, mais aussi de sa constitution moléculaire. De là se déduit un *procédé remarquable d'analyse spectrale*, qui n'entraîne aucune altération des corps : *on reconnaît un diamant ou un rubis, en le plaçant simplement dans le phosphoroscope* et analysant la lumière émise.

La chaleur active la phosphorescence, mais la fait disparaître plus vite. Elle modifie aussi la composition de la lumière émise : le sulfure de strontium lumineux bleu à la température ordinaire peut donner, entre -20° et $+150^{\circ}$, toutes les nuances du violet à l'orangé.

A une même température, un même corps peut émettre des rayons de teintes et de durées différentes, provenant de bandes d'émission qui apparaissent successivement, lorsqu'on augmente peu à peu la vitesse de rotation des disques du phosphoroscope : ces effets, qui tiennent généralement à la présence de matières différentes, ont été expliqués plus tard et montrent toute la fécondité de cette méthode d'analyse optique.

Edmond BECQUEREL (1860) mesura les intensités lumineuses de diverses substances au bout d'un temps plus ou moins long et compara leur extinction au refroidissement des corps par rayonnement.

Toutes ces découvertes sont exposées dans un ouvrage en deux volumes, *la lumière, ses causes et ses effets*, publié en 1869, dans lesquels les physiciens peuvent encore trouver bien des sujets de travail.

En 1872, Edmond BECQUEREL donna un mémoire sur les variations des spectres d'émission par phosphorescence des divers sels d'uranyle : cette étude fut continuée par Henri, puis par Jean BECQUEREL jusqu'aux très basses températures réalisables avec l'hydrogène liquide. Il importe d'appeler l'attention sur une méthode permettant de rendre visible d'une manière continue la région infra-rouge du spectre solaire, en utilisant un effet d'extinction que les rayons infra-rouges produisent sur la blende hexagonale phosphorescente. Par cette belle expérience (1873), il rendait visible pour la première fois les raies du spectre infra-rouge solaire, comme il avait découvert celles du spectre ultra-violet. Nous reviendrons plus loin sur ces travaux, qui furent repris et étendus par Henri BECQUEREL.

Il faut citer encore un travail, datant de 1874, sur l'emploi des substances absorbant la lumière, de la chlorophylle en particulier, pour rendre les plaques photographiques sensibles aux rayons qu'absorbent ces substances. C'était le principe de la méthode qui permet aujourd'hui d'avoir des plaques sensibles à toutes les couleurs.

Les dernières années de la vie d'Edmond BECQUEREL furent occupées à éclaircir divers points de ses travaux antérieurs : la phosphorescence sous l'influence des décharges élec-

triques dans les tubes à gaz *très raréfiés* (1885) ; l'influence de traces de substances diverses sur la lumière émise par certaines préparations phosphorescentes (1866-1888).

Pour terminer ce court exposé, il reste à mentionner des recherches météorologiques, une étude du climat de la France, des expériences relatives à l'action de la lumière sur la végétation, toutes questions du plus grand intérêt pour les sciences naturelles.

Henri BECQUEREL avait, dès son enfance, vécu dans l'atmosphère du laboratoire du Muséum et avait été élevé dans le culte de la Science. Reçu à l'âge de dix-neuf ans à l'École Polytechnique (1872), il en sortit dans le corps des Ponts et Chaussées et, pendant trois ans, mena de front ses études d'élève-ingénieur et ses premières recherches au laboratoire. Dès 1875, il publia un travail remarquable qui lui valut, à vingt-trois ans, la situation de répétiteur à l'École Polytechnique, où il succéda à POTIER comme professeur (1895). En 1878, à la mort de son grand-père, il remplaça comme aide naturaliste au Muséum son père nommé professeur ; il devait à son tour lui succéder en 1892. Dès 1889, l'Académie des Sciences lui avait ouvert ses portes, alors qu'il n'était âgé que de trente-six ans.

FARADAY, en découvrant qu'un corps transparent soumis à l'influence d'un champ magnétique fait tourner le plan de polarisation de la lumière qui le traverse, avait établi entre l'électromagnétisme et l'optique un lien inattendu et d'une importance considérable. Henri BECQUEREL comprit tout l'intérêt attaché à ce phénomène : « Jusqu'ici, dit-il, nous n'avons aucune idée des mouvements qui donnent naissance à l'électricité, tandis que les vibrations qui constituent les ondes lumineuses sont beaucoup mieux connues. » Il pensa donc que l'étude des propriétés optiques des corps soumis à l'influence d'un aimant devait être un puissant auxiliaire pour la recherche de l'origine et de la nature des manifestations électromagnétiques. On voit aujourd'hui combien ces prévisions étaient justifiées : la magnéto-optique constitue une des branches les plus fécondes de la physique moderne.

Edmond BECQUEREL avait, comme nous l'avons dit, établi que la rotation magnétique de la vibration lumineuse varie, en première approximation, comme l'inverse du carré de la longueur d'onde. Henri BECQUEREL, guidé par ce résultat et par des vues théoriques, pensa, contrairement à l'opinion de VERDET, qu'une relation devait exister entre le pouvoir rotatoire magnétique et l'indice de réfraction ; ses nombreuses mesures lui permirent de reconnaître que « la rotation magnétique des corps est liée à leur indice de réfraction et à une autre fonction qui varie avec le magnétisme spécifique des corps ». Ce fut son premier travail, en 1875.

Il pensa alors que l'influence magnétique de la part des molécules se manifesterait principalement avec les substances qui s'aimantent dans le sens du champ magnétique (dites aujourd'hui *paramagnétiques*), qui font, en général, tourner le plan de polarisation en sens inverse (négatif) du sens (positif) observé avec les autres substances. Il établit que les lois de rotations *négatives* sont différentes de celles des rotations *positives* ; les rotations négatives varient beaucoup plus vite que l'inverse du carré de la longueur d'onde et sont proportionnelles, dans le cas des corps magnétiques dissous, au carré de la concentration. Henri BECQUEREL a été le premier à affirmer l'existence d'une relation entre le pouvoir rotatoire

magnétique et les propriétés magnétiques des corps. Mais, à cette époque (1876), les connaissances sur l'origine des phénomènes magnétiques étaient à peu près nulles, et l'on ne pouvait remonter aux causes de l'effet FARADAY. On verra plus loin que ce sont seulement les recherches entreprises au laboratoire du Muséum trente ans plus tard (et encore poursuivies à l'heure actuelle) qui ont permis d'élucider ces questions, en accord avec les théories actuelles du magnétisme.

Avant 1876, le phénomène de FARADAY n'avait pu être observé avec les gaz. Les recherches antérieures d'Henri BECQUEREL lui permirent de prévoir l'ordre de grandeur des rotations dans les gaz et de construire un appareil approprié à cette recherche. Le succès répondit à son attente, et il montra que les gaz présentent aussi le phénomène (1878-1880). L'oxygène, en raison de ses propriétés magnétiques, présente une anomalie remarquable.

Le rôle des forces qui développent les phénomènes naturels ne cessait de préoccuper un esprit aussi pénétrant et aussi avide d'approfondir les grands problèmes de la nature. Aussi le voyons-nous appliquer ses découvertes à la recherche d'une influence du magnétisme terrestre sur les corps, et en particulier sur l'atmosphère (1878-1882). Il mesura la rotation magnétique du sulfure de carbone sous l'action du champ terrestre, donnant ainsi un moyen de déterminer, par une mesure optique, l'intensité de ce champ en valeur absolue. Puis il réussit, en s'orientant au milieu de grandes difficultés et écartant un effet qui masquait le phénomène cherché, à démontrer l'influence magnétique de la terre sur les propriétés optiques de l'atmosphère : le résultat expérimental s'est trouvé de l'ordre de grandeur prévu.

Cependant, il ne perdait pas de vue les applications pratiques ; et, à la conférence internationale des unités électriques (1882-1884), il proposa d'appliquer à la mesure absolue des courants électriques la rotation magnétique observée dans un corps servant d'étalon (sulfure de carbone).

Comme conclusion de ses recherches expérimentales, Henri Becquerel développa, en 1885, une théorie remarquable du phénomène de FARADAY. Il montra comment l'hypothèse d'un *mouvement tourbillonnaire* du milieu qui transmet les ondes lumineuses à l'intérieur des corps, mouvement qui prendrait naissance sous l'influence du champ magnétique, rend compte très simplement du phénomène et conduit aux lois observées dans le cas des corps diamagnétiques. Ici, nous entrons dans un domaine où les idées exprimées par Henri BECQUEREL étaient véritablement prophétiques, et il a fallu les découvertes ultérieures en magnéto-optique pour en faire comprendre toute la portée.

Nous abandonnons donc l'ordre chronologique pour résumer les recherches d'Henri BECQUEREL, faites de 1897 à 1899, sur le phénomène de ZEEMAN et la dispersion anormale.

Chacun sait qu'en 1896 M. ZEEMAN découvrit une action spécifique du magnétisme sur l'émission et sur l'absorption de la lumière : sous l'action d'un champ magnétique, les raies d'émission ou d'absorption des « spectres de lignes » des gaz et des vapeurs sont décomposées. La première théorie de ce phénomène, qui fut aussitôt donnée par LORENTZ, rattacha l'émission et l'absorption de la lumière à des mouvements d'électrons (1).

(1) Rappelons que les électrons sont des corpuscules possédant tous la même charge négative, qui est l'atome d'électricité, et la même masse qui est 1 850 fois plus petite que la masse de l'atome d'hydrogène.

Henri BECQUEREL, qui ne cessait de songer aux problèmes pouvant apporter des données nouvelles sur la constitution de la matière, attribua au phénomène de ZEEMAN une importance telle qu'il n'hésita pas à interrompre momentanément ses recherches sur la radio-activité qu'il venait de découvrir. Il avait compris que l'effet ZEEMAN était une manifestation directe de cette « action magnétique moléculaire » qu'il avait supposée autrefois, mais qui était restée alors imprécise et mystérieuse. Dans quelques notes remarquables, il a montré que les expériences de MM. ZEEMAN, MACALUSO et CORBINO, et celles qu'il avait lui-même réalisées, révélaient un lien étroit entre la polarisation rotatoire magnétique et l'effet ZEEMAN, et que la grande dispersion rotatoire auprès des raies d'absorption des vapeurs était une conséquence de la dispersion anormale (rapide variation de l'indice de réfraction auprès des raies d'absorption) ; il mit en évidence la dispersion anormale, déjà connue pour les solides et les liquides, mais non encore pour les gaz, par une expérience restée célèbre, réalisée avec la vapeur de sodium (1898). Il donne enfin l'explication complète de la biréfringence magnétique, découverte par VOIGT pour les radiations voisines des raies d'absorption des vapeurs de sodium et de lithium.

Ses premières idées recevaient ainsi une confirmation. Autrefois, on ignorait les électrons ; leur découverte est venue combler la lacune de la théorie primitive ; le « mouvement tourbillonnaire » imaginé par Henri BECQUEREL existe bien, mais, au lieu d'un mouvement de l'éther, c'est un mouvement des électrons sous l'action d'un champ magnétique. LARMOR a donné, un peu plus tard, la théorie de la « précession » qui conduit, pour la dispersion rotatoire magnétique, précisément à la loi découverte par Henri BECQUEREL.

Mentionnons encore un travail, fait en collaboration avec M. Henri DESLANDRES, sur l'effet ZEEMAN dans la vapeur de fer, où de nouveaux types de décomposition magnétique des raies spectrales ont été observés.

Il n'est pas sans intérêt d'ajouter qu'Henri BECQUEREL avait pressenti le phénomène que M. ZEEMAN a découvert : il m'a dit qu'il l'avait cherché en 1888 ; mais il devait échouer, ne pouvant à cette époque prévoir l'ordre de grandeur de l'effet et ne possédant pas un électro-aimant assez puissant ni des spectroscopes à assez grand pouvoir de résolution.

Revenant aux travaux plus anciens, nous citerons un mémoire sur les propriétés magnétiques développées par influence dans divers échantillons de nickel et de cobalt, comparées à celles du fer (1879) ; des recherches montrent que le magnétisme spécifique de l'ozone est notablement supérieur à celui de l'oxygène ; une étude sur le fer nickelé de Sainte-Catherine, qui présente la curieuse propriété de devenir très magnétique après avoir été chauffé au rouge ; une étude, faite en commun avec MOISSAN, montrant que la fluorine de QUINCIÉ contient du fluor à l'état libre (1890).

Il faut maintenant rappeler de belles recherches, en collaboration avec Edmond BECQUEREL, sur la température du sol jusqu'à 36 mètres de profondeur, ainsi que sur la température de deux sols, l'un dénudé, l'autre couvert de gazon. Il étudia également l'influence des froids de 1877 sur un sol couvert de neige, montrant avec quelle vitesse le gel se propage à l'intérieur de la couche de neige et dans le sol. Insistons davantage sur un mémoire publié en 1891, où Henri BECQUEREL montre que les formules données par FOURIER dans sa théorie du mouvement de la chaleur sont expérimentalement vérifiées

par les températures observées sous le sol, au Muséum, pendant l'hiver 1890-1891, hiver qui fut caractérisé par de nombreuses variations de température. Nous abordons maintenant l'une des plus importantes séries de travaux d'Henri BECQUEREL, ses recherches sur l'absorption et la phosphorescence, qui l'ont conduit à la découverte de la radio-activité.

Edmond BECQUEREL avait montré, comme nous l'avons dit, que, lorsque les radiations infra-rouges tombent sur une substance phosphorescente, elles éteignent la phosphorescence. Henri BECQUEREL observa que cette extinction est précédée d'une excitation temporaire qui fait apparaître avec grande netteté le spectre des radiations infra-rouges. Il réussit à déterminer les longueurs d'onde des principales bandes du spectre solaire infra-rouge ; puis il étudia les spectres d'absorption infra-rouges de l'eau, de l'atmosphère, de divers composés de terres rares ; il découvrit enfin les spectres infra-rouges de nombreuses vapeurs métalliques. Le champ nouveau ouvert ainsi à l'analyse spectrale comprend, à lui seul, un intervalle de longueurs d'onde plus étendu que l'ensemble de la région lumineuse et de la partie ultra-violette connue à cette époque (1883-1884).

Un autre travail concerne la phosphorescence des sels d'uranyle. Edmond BECQUEREL avait déjà observé que les spectres des composés uraniques sont constitués par sept ou huit bandes régulièrement distribuées ; de plus, le spectre d'absorption de ces substances est formé d'une série de bandes qui, dans le violet, prolongent la série des bandes d'émission par phosphorescence. Henri BECQUEREL donna la loi de distribution de ces bandes : la différence des fréquences des vibrations est sensiblement constante lorsqu'on passe d'un groupe au suivant ; de plus, les bandes d'absorption de plus grande longueur d'onde coïncident avec les bandes d'émission de plus courte longueur d'onde. Les sels d'uranyle forment une classe à part parmi les substances phosphorescentes, car ils sont phosphorescents par eux-mêmes : leurs spectres de phosphorescence sont en effet caractéristiques, non d'une matière diluée jouant le rôle de phosphorogène, mais de l'uranium lui-même (plus exactement de l'uranyle UO_2), et la structure de ces spectres se retrouve même dans les spectres d'absorption des composés uraneux non phosphorescents.

Ces recherches ont conduit Henri BECQUEREL à étudier l'absorption de la lumière dans les cristaux. Dans un grand nombre de minéraux contenant des terres rares, il observa que l'intensité de chaque bande d'absorption dépend de l'orientation de la vibration lumineuse à l'intérieur du cristal. Le phénomène est général dans tous les cristaux possédant des bandes d'absorption : un cristal optiquement *uniaxe* possède deux spectres principaux : un *spectre ordinaire* formé par l'absorption des vibrations normales à l'axe optique, et un *spectre extraordinaire*, correspondant aux vibrations parallèles à cet axe. Dans les cristaux *biaxes*, à chaque bande d'absorption correspondent trois directions rectangulaires de symétrie (*directions principales d'absorption*) ; le maximum et le minimum d'absorption, pour la bande considérée, ont lieu suivant deux de ces directions. Dans les cristaux orthorhombiques, les trois directions principales sont les mêmes pour toutes les bandes et coïncident avec les axes d'élasticité optique. Les cristaux clinorhombiques ont un axe de symétrie qui est toujours une direction principale commune à toutes les bandes, mais les deux autres directions principales peuvent être diversement orientées dans le plan de symétrie. Enfin,

dans les cristaux anorthiques, les directions principales d'absorption peuvent avoir une orientation quelconque.

L'observation des directions principales d'absorption conduit à des résultats importants. En effet, alors que d'autres propriétés optiques sont la résultante des effets dus à tous les atomes ou groupements atomiques engagés dans le cristal, l'absorption par des centres particuliers reste, au moins dans une certaine mesure, indépendante de l'action des centres voisins ; il arrive ainsi que les bandes qui n'ont pas les mêmes directions principales appartiennent à des substances différentes : le dédoublement du didyme en deux éléments, praséodyme et néodyme, vérifie d'une manière complète les déductions d'Henri BECQUEREL.

Ces recherches conduisent donc à une méthode d'analyse spectrale nouvelle, basée sur l'indépendance, au point de vue des directions principales d'absorption, des diverses matières engagées dans un cristal, et qui laisse intacts les cristaux étudiés.

Quelques années plus tard (1891), poursuivant ses études sur l'absorption et la phosphorescence, Henri BECQUEREL fit la première description des spectres de thermo-luminescence, émis par divers minéraux lorsqu'on les chauffe. Il reconnut que les bandes d'émission sont les mêmes quand la phosphorescence est excitée soit par la chaleur, soit par la lumière, mais que les intensités relatives et l'ordre d'apparition des bandes dépendent du mode d'excitation. Il put conclure que les bandes qui présentent entre elles, dans un même cristal, des différences dans leurs persistances ou des variations dans leurs intensités relatives caractérisent des substances différentes ou des composés différents d'un même élément.

Il reprit alors à un point de vue nouveau l'analyse de l'extinction de la luminescence en fonction du temps. Edmond BECQUEREL avait comparé cet effet à une sorte de refroidissement : Henri BECQUEREL montra qu'on pouvait rendre compte des résultats par un amortissement des vibrations. L'étude de l'extinction révèle aussi la présence de matières diverses dans un même minéral.

La découverte à laquelle le nom d'Henri Becquerel restera éternellement attaché, découverte qui a révolutionné la Physique, est celle de la *radioactivité*.

Le jour où les premières radiographies de RÖNTGEN furent présentées à l'Académie des Sciences par Henri POINCARÉ (20 janvier 1896), Henri BECQUEREL demanda à son confrère quelle était, dans l'ampoule, la région d'émission des rayons X : il lui fut répondu que le rayonnement émanait de la partie du verre frappée par les rayons cathodiques. Henri BECQUEREL fit remarquer à POINCARÉ que le verre était rendu fluorescent par les rayons cathodiques, et les deux savants furent immédiatement d'avis qu'il fallait chercher si certains corps, rendus fluorescents ou phosphorescents par une exposition à la lumière, émettaient un rayonnement analogue aux rayons X. Henri BECQUEREL entreprit aussitôt les recherches : les sels d'uranyle, qui avaient fait l'objet de tant de recherches au laboratoire du Muséum, et qui attiraient l'attention par leurs propriétés exceptionnelles, furent tout naturellement choisis pour tenter l'expérience.

Pensant que l'excitation par la lumière devait être nécessaire pour provoquer un rayonnement, Henri BECQUEREL plaça des lamelles de sulfate double d'uranyle et de potassium sur une enveloppe de papier noir, couverte d'aluminium, contenant une plaque photo-

graphique, et il exposa le tout au soleil pendant une journée ; le développement du cliché montra une tache faible limitée aux contours de la lamelle.

Un jour, un dispositif semblable au précédent ayant été monté, le ciel se trouva couvert ; Henri BECQUEREL, attendant une lumière plus favorable, enferma dans un tiroir le châssis contenant la plaque et recouvert des lamelles du sel d'uranyle. Le soleil ne se montra que trois jours plus tard ; Henri BECQUEREL, avant de reprendre l'expérience, prit la précaution de mettre une nouvelle plaque et de développer celle qu'il venait de retirer, qui était restée plus longtemps que les autres dans le châssis sous les lamelles du sel d'uranyle ; une impression intense s'est manifestée : il était clair qu'un rayonnement avait été émis à l'abri de toute lumière excitatrice : la radioactivité était découverte (1^{er} mars 1896).

Une série d'expériences fut alors montée avec divers sels d'uranyle restés plusieurs années à l'abri de la lumière, puis avec des sels uraneux non phosphorescents, enfin avec de l'uranium métallique ; les substances, enfermées dans des boîtes en plomb épais, étaient protégées contre tout rayonnement connu.

Henri BECQUEREL a donc établi que l'uranium et tous ses composés émettent *spontanément* un rayonnement qui traverse les corps opaques à la lumière ; de plus, il a montré que, à masses égales, l'uranium métallique est plus actif que ses sels et que l'activité de ceux-ci est en raison de leur teneur en uranium : il s'agissait donc d'une propriété appartenant à l'*atome* d'uranium.

Remarquons que, si l'atome perd spontanément de l'énergie, il doit se transformer : ainsi, les premiers résultats d'Henri BECQUEREL pouvaient déjà faire pressentir l'*évolution de la matière* qui fut établie plus tard par M. RUTHERFORD.

Toutes les expériences d'Henri BECQUEREL furent des conquêtes nouvelles : il ne tarda pas à observer que le rayonnement de l'uranium provoque la décharge des corps électrisés en rendant les gaz conducteurs de l'électricité. Cette propriété fondamentale est encore aujourd'hui celle qu'on utilise pour mesurer l'énergie du rayonnement ; il convient de ne pas oublier à qui on la doit.

Chacun sait que les magnifiques recherches de CURIE et de M^{me} CURIE ont montré que le thorium jouit des mêmes propriétés que l'uranium et ont amené la découverte d'éléments beaucoup plus actifs, tels, par exemple, que le polonium et le radium. C'est d'ailleurs le fait, démontré par Henri BECQUEREL, que la radioactivité de l'uranium est une propriété atomique, qui a permis d'affirmer que certains minerais d'uranium ou de thorium, plus actifs que ces métaux eux-mêmes, contenaient des éléments radioactifs nouveaux, et a conduit à rechercher ces éléments.

Avec le radium que CURIE lui donna, Henri BECQUEREL constata que le rayonnement est composé de rayons de pouvoirs pénétrants différents. Utilisant l'action d'un champ magnétique sur le rayonnement de radium, il obtint sur une plaque photographique les traces séparées de deux rayonnements différents (appelés depuis α et β). Il montra que les rayons β forment un faisceau dispersé par l'aimant.

Il découvrit aussi l'action d'un champ électrique sur les rayons et, par la mesure simultanée des déviations électrique et magnétique, put évaluer le rapport de la charge à la masse et l'énorme vitesse des corpuscules formant les rayons β : *il démontra que les pari-*

cules β sont des électrons. M. RUTHERFORD ayant signalé la légère déviabilité magnétique des rayons α , Henri BECQUEREL en donna une mesure précise.

Enfin, une belle expérience est d'avoir montré que les isolants *solides*, tels que la paraffine, deviennent conducteurs sous l'influence des rayons des corps radioactifs et gardent pendant quelques heures cette propriété.

Le cadre de cet article ne permet pas de développer les conséquences prodigieuses de la découverte de la radioactivité, qui a révolutionné la physique et ouvert des horizons nouveaux à diverses branches des sciences naturelles. L'étude des phénomènes radioactifs a montré que la matière est un formidable réservoir d'énergie et a puissamment contribué à étendre nos connaissances sur la structure des atomes. Elle a conduit à la découverte des *pléiades d'isotopes*, corps ayant les mêmes propriétés chimiques et des propriétés physiques extrêmement voisines, bien que possédant des masses atomiques différentes. Le bombardement de la matière par des particules α a, pour la première fois, permis la transmutation artificielle des éléments.

Dans la Nature, la présence des corps radioactifs répandus partout est l'une des causes de l'ionisation de l'air et joue un rôle important dans les grands phénomènes de météorologie et d'électricité atmosphérique. Les termes ultimes des transformations, l'hélium et le plomb, qui ont pris naissance au cours de l'évolution radioactive, ont permis, par leur présence dans les roches, de préciser l'âge de nombreux minéraux, et en particulier d'affirmer que certaines roches n'ont pas été remaniées et sont restées froides depuis près de deux milliards d'années.

Il est enfin à peine besoin de rappeler l'importance des rayons BECQUEREL dans un grand nombre d'applications médicales.

Cette vue d'ensemble des travaux accomplis par les anciens professeurs appelle deux remarques.

La physique expérimentale ne doit pas être séparée des sciences dites « sciences naturelles ». La création au Muséum d'une chaire de Physique appliquée aux sciences naturelles avait été jugée nécessaire en 1838, après les premiers travaux d'Antoine-César BECQUEREL ; le concours que notre laboratoire a apporté non seulement à la physique pure, mais aux sciences naturelles, a justifié l'espoir qu'on avait fondé sur son établissement.

D'autre part, la continuité dans les travaux accomplis a été une des causes de leur fécondité. Parmi les nombreux exemples qu'on pourrait donner, citons seulement le plus frappant : l'étude des décharges électriques a conduit Antoine-César BECQUEREL à examiner leur action sur les substances phosphorescentes ; Edmond BECQUEREL, qui avait collaboré à ce travail, continua seul l'étude de la phosphorescence et reconnut les propriétés exceptionnelles des sels d'uranyle ; Henri BECQUEREL avait encore approfondi l'étude de ces sels : dès la découverte des rayons X, il eut immédiatement recours aux sels d'uranyle, dans l'espoir de trouver un nouveau rayonnement ; ce fut la découverte de la radioactivité, *qui est venue à son heure*. Voici ce mot qu'Henri BECQUEREL, dans sa modestie, aimait à

dire : « La découverte de la radioactivité *devait* être faite dans le laboratoire du Muséum, et si mon père avait vécu en 1896, c'est lui qui en aurait été l'auteur. »

La plupart des travaux effectués depuis 1906 par Jean BECQUEREL ont eu pour origine la continuation d'une partie de l'œuvre de son grand-père et de son père. D'une part, Edmond, puis Henri BECQUEREL, avaient étudié le premier phénomène magnéto-optique connu, la polarisation rotatoire magnétique, qui soulevait encore beaucoup de controverses ; d'autre part, Henri Becquerel avait déterminé les lois de l'absorption de la lumière dans les cristaux : il convenait d'approfondir ces questions en cherchant quelle pouvait être l'influence d'un champ magnétique sur les propriétés optiques des cristaux. Presque dès le début des recherches, l'emploi de basses températures s'est trouvé nécessaire : il avait, en effet, été établi (CURIE, P. LANGEVIN) que les effets diamagnétiques ne sont guère sensibles aux variations de température, alors que l'aimantation paramagnétique varie à peu près en raison inverse de la température absolue ; donc, s'il devait y avoir des effets magnéto-optiques liés au diamagnétisme, et d'autres liés au paramagnétisme, il fallait, pour les reconnaître, abaisser la température. Les premières expériences, à la température ordinaire puis à la température de l'air liquide (1906-1907), ont montré les phénomènes cherchés : décomposition magnétique des bandes d'absorption des cristaux, polarisation rotatoire paramagnétique ; elles ont révélé en même temps d'autres faits, en dehors même de toute action d'un champ magnétique, et l'auteur a été conduit à créer un nouveau chapitre de l'optique : *l'optique aux très basses températures*. Jusqu'en 1924, les expériences ont été faites au Muséum, à l'exception d'un travail effectué au laboratoire cryogénique de Leyde, où KAMERLINGH ONNES avait invité l'auteur en 1908. Depuis onze ans, dans l'impossibilité d'obtenir en France des températures suffisamment basses, l'auteur passe environ deux mois par an à Leyde : il doit une profonde reconnaissance à M. le professeur W. J. DE HAAS, qui lui offre la plus large et la plus cordiale hospitalité dans le service qu'il dirige. Les magnifiques ressources du Kamerlingh Onnes Laboratorium permettent de réaliser des recherches optiques jusqu'à la température de $1^{\circ},3$ K. — $271^{\circ},8$ C., le zéro absolu étant à $-273^{\circ},1$ C.). Cependant, le laboratoire du Muséum ne reste pas inactif, car c'est au Muséum que sont faites les recherches préparatoires et celles des expériences qui n'exigent pas des températures inférieures à 77° K. (azote liquide).

L'auteur a d'abord établi (1907) que, sous la seule influence des changements de température, les spectres d'absorption de nombreux corps solides ou en solution subissent des modifications considérables. Quand on plonge les substances dans l'air liquide, les bandes d'absorption prennent une netteté et une finesse beaucoup plus grandes et en même temps changent d'intensité : la plupart deviennent plus intenses, et des bandes nouvelles apparaissent. Les minéraux et cristaux de terres rares ont été particulièrement étudiés, car ils sont remarquables par la richesse de leurs spectres en bandes déjà assez fines à la température ordinaire ; beaucoup de ces bandes sont complexes ; en effet, aux basses températures, elles se résolvent en raies, dont certaines sont comparables, comme finesse, aux raies des vapeurs.

Il a été reconnu (1907) que, dans un large domaine de températures, allant au moins jusqu'à la température de l'air liquide, la largeur des bandes varie à peu près proportionnellement à la racine carrée de la température absolue.

Dans les cristaux de terres rares, beaucoup de bandes passent par un maximum d'intensité à une certaine température, généralement très basse (1908) ; mais d'autres ont une intensité croissante qui tend vers une limite pratiquement réalisée aux températures de l'hélium liquide : à ces températures ($4^{\circ},2$ à $1^{\circ},3$ K.), il ne subsiste qu'un spectre très simplifié, que l'auteur (1924) a appelé le *spectre fondamental*. Ces effets sont restés longtemps inexplicables : aujourd'hui, on voit clairement que les variations d'intensités des bandes révèlent un remaniement, fonction de la température, de la répartition statistique des ions entre les diverses valeurs énergétiques qu'ils peuvent acquérir (niveaux d'énergie). A température suffisamment basse, l'état de plus basse énergie ou état fondamental peut être considéré comme seul présent, et le spectre fondamental provient de transitions, sous l'action de la lumière, à partir de cet état.

L'auteur a étudié diverses solutions refroidies et solidifiées (1907). L'abaissement de température permet d'observer les variations des spectres sous diverses influences ; mais il serait trop long d'exposer ici les applications.

Une expérience (1909) très simple a montré la liaison entre le pouvoir rotatoire et l'absorption dans le cinabre : par refroidissement, le bord de la bande se déplace du rouge au vert, et la grande dispersion rotatoire accompagne le bord de la bande.

Il convenait aussi d'observer la luminescence aux basses températures. En 1908, quelques mois avant sa mort si prématurée, Henri BECQUEREL, en collaboration avec KAMERLINGH ONNES et avec l'auteur, avait commencé cette étude pour les sels d'uranyle. Le travail a été continué par l'auteur (1908-1910). Les bandes se résolvent en raies ; grâce à cette décomposition, l'identité de structure des divers groupes a été démontrée, et la loi de répartition, déjà soupçonnée autrefois, a été confirmée par des mesures précises. Un des résultats les plus importants a été d'établir que les spectres des sels d'uranyle, du type « spectres de bandes », sont attribuables au groupement UO^2 et non à l'atome d'uranium.

L'auteur a étudié la phosphorescence *polarisée* du rubis et de l'émeraude (1910). Récemment (1932), ayant observé les spectres d'absorption et de luminescence du rubis jusqu'à $1^{\circ},5$ K., il a reconnu la présence simultanée d'un « spectre de bandes » et d'un « spectre de lignes » : dans le premier interviennent les oscillations des ions ou celles du réseau cristallin, tandis que le second est dû aux transitions énergétiques de l'ion chrome. Aux températures de l'hélium liquide, la luminescence du rubis est splendide.

Citons encore un travail (1911) qui a mis fin à une controverse entre plusieurs physiciens : il a été prouvé, par une méthode sensible, que l'indice de réfraction n'est pas modifié par la fluorescence.

Enfin un résultat important (1929) est d'avoir montré que, contrairement à ce qu'on pensait généralement, les spectres des cristaux de terres rares sont du type « spectres de lignes », par suite attribuables aux ions métalliques et non à des groupements moléculaires.

A la suite des travaux de l'auteur, l'emploi des basses températures en optique est devenu aujourd'hui d'un usage courant dans plusieurs laboratoires étrangers.

Des phénomènes analogues se produisent pour les spectres des solutions de terres rares, refroidies et solidifiées.

MM. DU BOIS et ELIAS (1909) ayant observé une décomposition magnétique des raies de luminescence du rubis, l'auteur a été conduit (1910) à compléter l'étude faite par ces physiciens. Récemment (1932), il a montré qu'aux très basses températures les dissymétries d'intensités sont opposées pour l'absorption et pour la fluorescence, dans le cas des bandes renversables : cet effet n'est pas encore complètement expliqué.

Un des résultats les plus importants des travaux de l'auteur est d'avoir permis d'établir [Rita BRUNETTI (1928) ; Jean BECQUEREL (1929)] que les spectres des cristaux étudiés sont formés de raies déjà partiellement décomposées ; *ces raies sont des composantes discrètes et fortement séparées, dues à l'action d'un champ électrique cristallin*. Il s'agit d'un effet de même nature que l'effet STARK, mais cependant différent, car l'effet STARK est une décomposition par un champ électrique homogène et intense, tandis que le champ cristallin agit, non par son intensité, mais par sa grande inhomogénéité. Jusqu'alors, on n'avait pas soupçonné le rôle essentiel du champ interne, qui supprime partiellement la dégénérescence des niveaux d'énergie de l'ion libre. L'influence de ce champ a une répercussion dans toutes les recherches concernant le paramagnétisme des solides : aujourd'hui, une voie nouvelle est ouverte, qui permet de préciser le mécanisme de l'aimantation des cristaux, et, depuis 1929, des travaux importants sont dus à d'éminents théoriciens (MM. BETHE, KRAMERS, VAN VLECK, PENNEY et SCHLAPP).

Revenons à la polarisation rotatoire magnétique. Les premières expériences, à la température ordinaire, avaient montré l'existence, dans toute l'étendue du spectre, de quelques cristaux de terres rares, d'un pouvoir rotatoire magnétique de sens *négalif*. Dès qu'il fit usage de l'air liquide, l'auteur constata que ce pouvoir rotatoire croissait à peu près en raison inverse de la température absolue : un rapprochement évident avec la loi de CURIE, relative à l'aimantation, lui a permis d'affirmer (1907) que ce pouvoir rotatoire est d'origine paramagnétique. La *polarisation rotatoire paramagnétique*, dont la possibilité avait été niée, était donc découverte par une expérience des plus simples.

Il fallait préciser de quelle manière ce pouvoir rotatoire se rattache à la décomposition des bandes d'absorption ; l'étude détaillée de ses variations aux environs des bandes a montré que l'effet propre de chacune d'elles est de participer au pouvoir rotatoire de deux façons différentes, par la séparation en composantes, indépendante de la température (comme dans l'effet Zeeman), et par la dissymétrie d'intensités des composantes, fonction de la température. A ces deux modes d'action se rattachent respectivement la *polarisation rotatoire diamagnétique* et la *polarisation rotatoire paramagnétique*. *Le phénomène de Faraday se compose donc de deux effets d'origines différentes*, dont le mécanisme est maintenant connu.

La polarisation rotatoire paramagnétique étant une manifestation de l'orientation des porteurs de moment magnétique permet une étude expérimentale des lois du paramagnétisme par une méthode optique généralement précise. Tel a été le principal objet des travaux de l'auteur depuis 1927, en majeure partie à Leyde, en collaboration avec MM. W. J. DE HAAS et J. VAN DEN HANDEL. Il serait beaucoup trop long de détailler les résultats ; bornons-nous à signaler que diverses lois d'aimantation nouvelles ont été obtenues : aux très basses

températures, dans les cristaux tels que les éthylsulfates de terres rares, où les ions magnétiques sont très dilués, on obtient la loi la plus simple, qui révèle un dédoublement, par le champ magnétique, du niveau d'énergie fondamental. A ces températures, la rotation cesse d'être proportionnelle au champ, et la *saturation paramagnétique* a pu être pratiquement réalisée avec l'éthylsulfate de dysprosium. Dans d'autres cas, il se manifeste un « champ moléculaire ». Dans la sidérose, le niveau fondamental de l'ion fer n'est pas magnétique : la preuve est que, aux températures de l'hélium liquide, il n'y a qu'une très faible rotation proportionnelle au champ, et indépendante de la température ; mais, lorsque les niveaux d'énergie supérieurs entrent en jeu, le paramagnétisme fonction de la température apparaît : par suite, lorsqu'on élève la température, le pouvoir rotatoire croît d'abord rapidement, passe par un maximum à une température comprise entre celles de l'hydrogène et de l'azote liquides, puis décroît aux températures plus hautes. Signalons enfin que la rotation paramagnétique peut atteindre des valeurs colossales aux très basses températures (tysonite, rotation de $1\,520^\circ$ par millimètre d'épaisseur, dans un champ de 27 000 gauss, à $1^\circ,32$ K.).

Ces recherches concernent les cristaux uniaxes, dont l'axe optique est orienté parallèlement au champ magnétique. Cependant, pour la tysonite, il a été possible de déterminer, depuis la température ordinaire jusqu'aux plus basses températures, le pouvoir rotatoire magnétique normal à l'axe, malgré sa superposition à la biréfringence (Muséum, 1929 ; Leyde, 1930).

Pour terminer cet exposé, il reste à citer des recherches sur le phénomène de HALL aux basses températures (1912-1913) ; deux ouvrages d'enseignement sur le principe de relativité et la théorie de la gravitation (1922-1923) ; un opuscule (1923) sur le champ de gravitation d'une sphère matérielle (mise au point du problème et réfutation des objections de PAINLEVÉ) ; une controverse avec M. BERGSON sur la notion de temps (publiée par M. BERGSON dans la 2^e édition de son ouvrage *Durée et simultanéité*, 1923) ; enfin, deux tomes d'un *Traité de physique* (1924-1926).

Recherches de physiologie végétale

dans les hauts vides et aux basses températures

faites au Laboratoire de Physique appliquée aux sciences naturelles du Muséum

Par M. PAUL BECQUEREL,
Professeur à la Faculté des Sciences de Poitiers.

Le Laboratoire de Physique a fourni à M. Paul BECQUEREL les moyens indispensables, les appareils les plus perfectionnés, pour poursuivre quelques-unes de ses recherches de physiologie végétale sur l'action des hauts vides et des basses températures. On ne peut en donner ici qu'une brève analyse. C'est ainsi qu'a été résolu l'important problème de la vie latente des germes, qui joue un si grand rôle dans la conservation et la dissémination de la vie à la surface du globe.

Les résultats des expériences de l'auteur ont été publiés dans les notes suivantes des *Comptes Rendus de l'Académie des sciences* : La suspension de la vie des graines décortiquées, sous les actions combinées de la déshydratation, des hauts vides et des basses températures de l'air et de l'hydrogène liquides (t. CXLVIII, p. 1052, 1909); La vie latente des spores des Mucorinées et des Ascomycètes aux basses températures (t. CL, p. 1437, 1910); La vie latente des graines décortiquées dans le vide à la température de l'hélium liquide (t. CLXXXI, p. 805, 1925); La vie latente des grains de pollen dans le vide à -271° (t. CLXXXVIII, p. 1309, 1929); La vie latente des spores des Fougères dans le vide aux basses températures (t. CXC, p. 1139, 1930); La vie latente des spores des Mousses dans l'azote liquide (t. CXCIV, p. 1379, 1932).

La déshydratation des germes, les hauts vides, l'action de l'air et de l'azote liquides ont été réalisés au Laboratoire du Muséum. Mais, pour connaître le rôle des températures les plus basses, que malheureusement on ne pouvait obtenir ici, il a fallu terminer ces expériences au laboratoire cryogène de Leyde, grâce aux bienveillants concours de KAMMERLINGH-ONNES et de DE HAAS. Ces expériences ont transformé entièrement les notions que les physiologistes professaient dans leurs ouvrages classiques sur la vie latente. Elles ont prouvé que la vie latente des graines et des spores placées dans des conditions nor-

males de leur conservation et dans leur état de dessiccation naturelle, n'est pas une vie ralentie aérobie nécessitant par conséquent des échanges gazeux avec l'atmosphère. C'est une vie anaérobie d'autant plus lente que la teneur en eau du protoplasma est plus faible. D'autre part, elles ont démontré un fait capital : c'est que, sous les actions simultanées de la déshydratation, des hauts vides et des plus basses températures, on peut suspendre la vie dans les germes sans provoquer leur mort.

Dans ces conditions particulières, la vie anaérobie ralentie des graines et des spores devient une vie suspendue, une anabiose réelle.

En effet, c'était la première fois que l'on apportait la démonstration expérimentale que, sous les actions simultanées de la déshydratation la plus poussée, des hauts vides et des plus basses températures (6 semaines dans l'air liquide à -189° , 77 heures dans l'hydrogène liquide à -253° , 17 heures dans l'hélium liquide à $-271^{\circ},7$), *on pouvait supprimer dans les germes des végétaux, spores ou graines, l'état gazeux de toutes traces d'air, l'état liquide de toutes traces d'eau, l'état colloïdal des diastases et du protoplasma, par conséquent arrêter toutes les réactions physicochimiques colloïdales de l'assimilation et de la désassimilation protoplasmiques sans porter atteinte, à leur retour, à la reprise de la vie.*

La découverte de la suspension expérimentale de la vie dans les germes des végétaux a une grande importance biologique.

Non seulement elle éclaire le problème si ardu du véritable mécanisme physico-chimique de la vie en nous apportant une preuve nouvelle de son rigoureux déterminisme, mais encore elle nous fait connaître quelles sont les conditions physiques que nous devons réaliser, si nous voulons conférer au protoplasma des spores et des graines un pouvoir germinatif illimité permettant à leurs espèces de se conserver indéfiniment sur la terre.

* * *

Un autre problème de physique végétale a encore été étudié par M. Paul BECQUEREL dans ce laboratoire ; c'est la recherche des causes de la résistance des végétaux aux froids les plus rigoureux. Il a essayé de les mettre en évidence par un grand nombre d'expériences sur les racines tuberculeuses des Renoncules, sur les jeunes plantules des Céréales, sur des Mousses, des Lichens, des Algues vertes.

Ces organismes, dont il avait déterminé la teneur en eau et dont il avait arrêté la déshydratation à certains stades, ont été plongés pendant dix-huit jours au contact direct de l'azote liquide à la température constante de -190° . N'ont résisté que ceux dont la teneur en eau ne dépassait pas 9,5 p. 100 du poids sec et dont les cellules avaient eu auparavant la faculté d'atteindre, sans être plasmolysées, ce degré de déshydratation.

Les organismes qui ont la propriété de se déshydrater suffisamment pendant l'été et l'automne, de concentrer leur suc cellulaire, d'augmenter ainsi leur résistance à la plasmolyse pour passer graduellement à l'état de vie ralentie anaérobie, puis à l'état d'anhydrobiose, sont donc non seulement capables de résister aux froids les plus rigoureux, mais encore de subir les actions des basses températures. Ainsi se trouve expliquée leur persistance pendant l'hiver sur le sol gelé, au sommet des montagnes, au bord des glaciers ou

dans les contrées polaires, comme autour de Werchojansk, en Sibérie, où la température oscille pendant près de six mois entre -30° et -61° C. Telles sont les conclusions qui ressortent des notes publiées à l'Académie des Sciences : L'anhydrobiose des tubercules des Renoncules dans l'azote liquide (t. CXCIV, p. 1975, 1932); La reviviscence des plantules desséchées soumises aux actions du vide et des très basses températures (t. CXCIV, p. 2159, 1932); Influence des basses températures de l'azote sur les Algues, les Lichens et les Mousses; Rapport du VI^e Congrès international du froid, p. 456, Buenos-Ayres, août 1932.

Enfin l'auteur, dont les expériences démontraient la conservation des germes dans le vide aux basses températures, a été amené à contrôler expérimentalement la théorie d'ARRHÉNIUS de l'ensemencement des mondes par la lumière, la radiopanspermie inter-astrale.

C'est ainsi qu'il a imaginé une série d'expériences où les conditions physiques qu'on suppose devoir exister dans les espaces célestes, déshydratation, vide le plus poussé, basses températures, radiations ultra-violettes, furent réunies. A leurs influences combinées furent soumis les germes microscopiques les plus résistants, les spores du Pénicille, de l'Aspergille, du Mégatère, du Charbon. Au bout de cinq ou six heures, selon les espèces, tous ces organismes en vie suspendue succombèrent. La lumière des étoiles étant riche en radiations ultra-violettes abiotiques, l'ensemencement des mondes sous leur action devient impossible. La théorie d'ARRHÉNIUS avait donc perdu sa base expérimentale. Les résultats de ces expériences ont été présentés à l'Académie des Sciences, le 4 juin 1930 et dans une conférence à la Société astronomique de France le 7 mars 1934 : « La vie terrestre provient-elle d'un autre monde ? ».
