

JEAN-LOUIS BASDEVANT

MAÎTRISER LE NUCLÉAIRE

Sortir du nucléaire
après Fukushima



EYROLLES

JEAN-LOUIS BASDEVANT

DEUXIÈME ÉDITION
REVUE ET AUGMENTÉE

MAÎTRISER LE NUCLÉAIRE

Sortir du nucléaire après Fukushima



Jean-Louis Basdevant en compagnie de Georges Charpak. Porquerolles, décembre 1978. © Anne Dirat

Ancien élève de l'École normale supérieure, directeur de recherche au CNRS, Jean-Louis Basdevant a été pendant trente-cinq ans professeur à l'École polytechnique dont il a présidé le département de physique. À côté de son célèbre cours de mécanique quantique, il a créé les cours d'énergie nucléaire et d'énergie-environnement.

Spécialiste de physique des hautes énergies et d'astrophysique nucléaire, il a travaillé au Lawrence Berkeley National Laboratory, au CEA à Saclay, au CERN à Genève, au Fermi National Accelerator Laboratory et à l'Argonne National Laboratory, près de Chicago, ainsi qu'à l'INFN de Turin.

Découverte inopinément peu avant 1900, la physique nucléaire a marqué les temps modernes dans des domaines souvent étrangers les uns aux autres comme la médecine (rayons X, radiothérapie), la guerre (armement nucléaire), les arts (carbone 14) ou encore l'astrophysique (observation des supernovæ).

Avec quelques schémas et beaucoup d'exemples, Jean-Louis Basdevant nous explique ici en termes clairs ce que sont la radioactivité, ses applications et ses dangers. Il nous livre les clés des mécanismes qui sont à l'œuvre dans les réactions nucléaires, avant, pendant et après, ce qui le conduit à étudier la question hautement sensible de l'électronucléaire.

À l'appui d'une analyse des grandes catastrophes — Three Miles Island en 1979, Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011, dont il a minutieusement étudié les conséquences — il met en lumière l'avenir de cette filière technologique : différents types de réacteurs en service, différents modes de production mais aussi prolifération des armements.

Comprenant en outre une synthèse sur les ressources énergétiques (et la consommation très inégale d'énergie à l'échelle mondiale), cette édition entièrement refondue nous donne les moyens de prendre position en connaissance de cause dans un débat qui, cette fois, ne restera pas une affaire de spécialistes.

Code éditeur : G13436
ISBN : 978-2-212-13436-0

Couverture : Christophe Picaud

MAÎTRISER LE NUCLÉAIRE

Sortir du nucléaire après Fukushima

JEAN-LOUIS BASDEVANT

MAÎTRISER LE NUCLÉAIRE

Sortir du nucléaire après Fukushima

Deuxième édition revue et augmentée

EYROLLES



ÉDITIONS EYROLLES
61, boulevard Saint-Germain
75240 Paris cedex 05
www.editions-eyrolles.com

ISBN : 978-2-212-13436-0

Aux termes du Code de la propriété intellectuelle, toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, scannérisation, numérisation, etc.) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. L'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie doit être obtenue auprès du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) — 20, rue des Grands-Augustins — 75006 Paris.

© 2011 pour la première édition, Groupe Eyrolles

© 2012 pour la deuxième édition revue et augmentée, Groupe Eyrolles

TABLE DES MATIÈRES

Avant propos	5
Introduction	7
1 L'énergie : besoins, ressources, exploitation	19
1.1 L'énergie	19
1.2 L'énergie de combustion chimique	21
1.3 Quelques caractéristiques	23
1.4 Ressources énergétiques	28
1.5 Consommation d'énergie	29
1.6 Situation de la France	35
2 Qu'est-ce que la physique nucléaire ?	39
2.1 Les atomes et leur noyau	39
2.2 Protons et neutrons	40
2.3 Édifices nucléaires, énergie de liaison	43
2.4 Réactions, énergie nucléaire	46
2.5 L'instabilité des noyaux, source de la radioactivité	49
3 Radioactivité : applications et risques	53
3.1 Activité d'une substance radioactive	54
3.2 Effets des rayonnements ionisants	55
3.3 Les prodiges de la médecine nucléaire	58
3.4 Dosage de la radioactivité	61
3.5 Applications dans le domaine civil	64
3.6 Effets biologiques des rayonnements ionisants	70
3.7 Toxicité radiologique et toxicité chimique	74
4 La fission	75
4.1 Produits de fission	76

4.2	Énergie de fission	78
4.3	Le danger de l'énergie différée dans un réacteur	79
4.4	Matériaux fissiles et matériaux fertiles	80
4.5	Fabrication du plutonium, destination d'un réacteur	83
4.6	Réactions en chaîne, principe des réacteurs	84
4.7	Modérateur, ralentissement des neutrons	85
4.8	D'où vient le premier neutron d'une réaction en chaîne?	87
4.9	Divergence, masse critique	88
5	Énergie électronucléaire	91
5.1	Les réacteurs nucléaires	92
5.2	Réacteurs à eau pressurisée	94
5.3	Réacteurs à eau bouillante	100
5.4	Les autres filières à neutrons thermiques	101
5.5	Le contrôle des réacteurs	102
5.6	L'accident grave : la fusion du cœur d'un réacteur	104
5.7	Réacteurs EPR	107
6	Combustible, déchets, stockage, démantèlement	115
6.1	Le cycle du combustible nucléaire	115
6.2	Stockage des déchets	121
6.3	Démantèlement d'une installation	129
7	Les accidents nucléaires civils	133
7.1	Les accidents nucléaires	133
7.2	L'accident de Three Mile Island	134
7.3	La catastrophe de Tchernobyl	141
8	La catastrophe de Fukushima	151
8.1	L'accident : les premières semaines	151
8.2	Installations de Fukushima	160
8.3	Déroulement de l'accident	164
8.4	Fusion des cœurs	168
8.5	La cause du désastre : séisme ou tsunami?	170
8.6	Bilan global actuel	173
9	Que penser et que faire après Fukushima?	177
9.1	Naissance et évolution de l'électronucléaire	177
9.2	Au cœur des accidents	180

9.3	Répercussions de l'accident de Fukushima	184
9.4	Le droit à la sécurité	191
9.5	Le mensonge et l'irresponsabilité	196
9.6	L'homme et la planète	198
10	Dossier : Réacteurs du futur, fusion thermonucléaire	201
10.1	Les filières de réacteurs à neutrons rapides	201
10.2	Réacteurs couplés à un accélérateur, le projet Rubbia....	203
10.3	La génération IV	207
10.4	La fusion thermonucléaire	208
11	Dossier : La prolifération nucléaire	217
11.1	Fonctionnement et fabrication d'une arme nucléaire	217
11.2	Les moyens de la prolifération – matières fissiles	223
11.3	Cadre juridique de la lutte contre la prolifération.....	228
	Index	231

AVANT-PROPOS

CE LIVRE a pour origine le désastre nucléaire survenu à Fukushima le 11 avril 2011, qui a bouleversé les idées et les discours sur l'utilisation de l'énergie électronucléaire. La première édition, parue le 13 mai 2011, reposait sur un ensemble de données et d'informations assez restreint, qui n'a cessé de grossir avec le temps. On a pu constater que quantité de phénomènes et d'accidents avaient été ignorés, voire cachés, dans les premiers temps. Neuf mois après, l'information est beaucoup plus importante. Elle permet de comprendre plus clairement le déroulement de la catastrophe et ses conséquences. Elle permet aussi de tirer des conclusions plus amples sur le futur des technologies électronucléaires. Elle permet, enfin, de confirmer que des informations comme la fusion des cœurs et le *melt-out* gravissime étaient connues de Tepco dès les premiers jours, même si l'on a tenté de les dissimuler.

Dans cette deuxième édition, j'ai également tenté d'amener le texte à un niveau accessible à un public plus large que dans la première.

Quelques changements plus conséquents sont les suivants. J'ai consacré un chapitre entier (le chapitre 1) à la question de l'énergie en général, avec notamment des données sur la consommation et les ressources mondiales. J'y ai notamment inclus un développement sur les énergies alternatives. On peut, bien sûr, sauter tout ou partie de ce chapitre.

Les trois chapitres suivants portent sur des généralités de physique nucléaire – noyaux atomiques, radioactivité, fission – que l'on peut parfaitement sauter si l'on veut aller à l'essentiel sur les problèmes du nucléaire et la catastrophe de Fukushima.

Le chapitre 8 sur le désastre de Fukushima a été entièrement revu, c'est évident. J'y ai incorporé toutes les données dont je disposais en donnant le bon à tirer. De même, mes conclusions, exposées au chapitre 9, sont considérablement développées par rapport à la première édition.

La partie générale du livre, qui s'applique à toute la technologie nucléaire et électronucléaire, a pour origine deux cours que j'ai enseignés à l'École polytechnique : « Énergie nucléaire » et « Énergie et environnement ». Je dois beaucoup à James Rich et Michel Spiro. Ils ont joué un rôle primordial dans la conception de ces enseignements. Nous avons écrit deux livres ensemble :

- *Énergie nucléaire*, paru aux Éditions de l'École polytechnique en 2002 ;
- *Fundamentals in Nuclear Physics. From nuclear structure to cosmology*, Springer, New York, 2005.

Qu'ils trouvent tous deux ici l'expression de ma reconnaissance et de ma profonde amitié.

Je remercie Michel Gonin – qui a magistralement repris le cours « Énergie et environnement » à l'École polytechnique – pour toute l'aide qu'il m'a apportée.

Je remercie mes élèves de l'École polytechnique, notamment ceux des promotions X 1994 à X 2004, pour ce qu'ils m'ont apporté par leurs remarques et leurs travaux de recherche tant sur l'énergie nucléaire que dans les enseignements qui lui étaient reliés sur les thèmes « Énergie et environnement » et « Cosmologie ». Plusieurs passages de ce livre leur sont dus.

Georges Charpak, disparu le 29 septembre 2010, était un ami proche de longue date. Il a écrit avec Richard Garwin un livre beau et complet sur le sujet de l'énergie nucléaire : *Feux follets et champignons nucléaires*, Odile Jacob, Paris, 1997. Il m'a terriblement manqué dans la rédaction de ce petit livre destiné au plus large public possible. Je connaissais ses opinions et je les partageais. Avec la catastrophe de Fukushima, il aurait été d'un grand secours pour clarifier les choses et me conforter dans l'évolution, importante, de mes propres idées.

Jean-Louis Basdevant
Paris, décembre 2011

INTRODUCTION

Le début ne laisse pas présager la fin.

HÉRODOTE

DÉCOUVERTE DE FAÇON INOPINÉE, ou presque, par Henri Becquerel au crépuscule du XIX^e siècle, la physique nucléaire aura profondément marqué le XX^e siècle. La formule d'Einstein $E = mc^2$ la symbolise dans l'imaginaire collectif¹. Cette formule est associée autant au génie d'un homme qu'à la capacité que l'humanité a acquise de s'autodétruire. L'humanité s'est enfin interrogée sur son futur collectif. Le retraitement et le stockage des déchets nucléaires, par exemple, nous portent à nous préoccuper de ce que nous aurons laissé à nos descendants dans des milliers d'années.

La physique nucléaire a marqué le monde dans le domaine militaire et politique. L'arme nucléaire qui, à la différence de l'arbalète ou de la poudre à canon, n'a été utilisée que deux fois en août 1945, moins de cinquante ans après sa découverte, a bouleversé l'échiquier mondial et la politique internationale depuis lors.

Dans le domaine technologique, bien entendu, la production d'énergie et les innombrables utilisations pratiques de la radioactivité, dans la médecine comme dans l'art, l'archéologie ou la recherche fondamentale, sont devenues des éléments familiers de la vie humaine. Mais ces technologies suscitent une indiscutable méfiance. On préfère voir leur résultat plutôt que les manipuler.

En 1903, le troisième prix Nobel de physique a été décerné pour moitié à Henri Becquerel, pour moitié à Pierre et Marie Curie, pour la découverte de la radioactivité. Henri Becquerel avait découvert le phénomène, Pierre et Marie Curie en avaient montré l'importance et l'étendue.

1. À tort, on le sait ; cette formule vaut pour la cuisson d'un œuf aussi bien que pour l'explosion d'une supernova.

C'est Rutherford, Prix Nobel de chimie 1908, qui, en s'intéressant à ces phénomènes à partir de 1899, doit être considéré comme le fondateur de la physique nucléaire proprement dite. On trouvera plus bas un récit de la découverte de la radioactivité et des premières questions qu'elle a suscitées.

QUELQUES POINTS DE REPÈRE HISTORIQUES

L'histoire de la physique nucléaire commence en 1896 avec la découverte de la radioactivité par Becquerel. Elle s'étend jusqu'à aujourd'hui. Cette histoire peut être divisée en trois parties : la découverte du noyau et de ses propriétés fondamentales jusqu'en 1939, le développement de la spectroscopie nucléaire et des modèles nucléaires de 1947 à 1960, l'émergence d'une théorie microscopique unificatrice et l'identification de mécanismes fins de 1958 à nos jours.

Depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale, la science nucléaire a connu un essor considérable, mais même si elle s'était arrêtée en 1960 (voire en 1939), pratiquement toutes ses applications, aussi bien technologiques qu'astrophysiques, existeraient aujourd'hui. En effet, elles ne font appel qu'aux phénomènes connus à cette époque et peuvent se contenter d'interprétations élémentaires.

La chronologie des principales étapes de cette première phase est la suivante.

1868 Classification périodique de Mendeleïev.

1895 Découverte des rayons X par Röntgen.

1896 Découverte de la radioactivité par Becquerel.

1897 Identification de l'électron par J.J. Thomson.

1898 Séparation des éléments polonium et radium par Pierre et Marie Curie.

1911 Découverte du noyau par Rutherford, modèle « planétaire » de l'atome.

1924-1928 Théorie quantique (de Broglie, Schrödinger, Heisenberg).

1928 Théorie de la pénétration des barrières de potentiel par effet tunnel, application à la radioactivité α , par Gamow, Gurney et Condon.

1929-1932 Premières réactions nucléaires avec le cyclotron de Lawrence à Berkeley, et l'accélérateur Van de Graaff par Cockcroft et Walton.

- 1932** Identification du neutron par Chadwick.
- 1934** Découverte de la radioactivité artificielle par F. et I. Joliot-Curie.
- 1934** Découverte de la capture neutronique par Fermi.
- 1938** Bethe et Weizsäcker comprennent que l'énergie des étoiles provient de réactions de fusion thermonucléaire.
- Décembre 1938** Découverte de la fission par Hahn et Strassman.
- 1939** Interprétation théorique de la fission par N. Bohr et Wheeler.
- 1942** Le premier réacteur, construit par Fermi, diverge à Chicago.
- 1953** Salpeter comprend la réaction fondamentale de fusion de deux protons en un noyau de deutérium dans le Soleil.

ÉTENDUE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

La physique nucléaire a engendré en un siècle une série inimaginable de retombées techniques, économiques, politiques et, bien entendu, scientifiques jusqu'à la physique des particules élémentaires et des interactions fondamentales, dont on a, paradoxalement, une théorie plus complète que de la physique des noyaux elle-même².

Les noyaux atomiques sont des systèmes de protons et de neutrons, de masses voisines, liés par les forces nucléaires. Il existe des milliers de noyaux différents : 260 sont stables, 325 existent dans la nature, on en a fabriqué 6 000 artificiellement, alors qu'il n'existe qu'une centaine d'atomes, différents isotopes d'un même élément ayant les mêmes propriétés chimiques. Une des courses aux records du monde actuelles consiste à synthétiser des noyaux lourds instables (on est arrivé en 1999 à la région, « mythique » pour les physiciens nucléaires, des éléments $Z = 114$ et 126 que la théorie prévoit être particulièrement stables).

La physique des noyaux proprement dite est un domaine de recherche en plein renouveau depuis une dizaine d'années avec la mise en service de nouvelles machines : les accélérateurs à ions lourds, notamment les machines de Berkeley, de Caen (le grand accélérateur national à ions lourds GANIL), de Darmstadt, de Dubna, et le LHC du CERN à Genève. La physique des noyaux atomiques reste une science fondamentale. C'est en soi un problème de mécanique quantique complexe, un véritable

2. C'est évidemment un faux paradoxe : la structure de l'ADN découle, en principe, entièrement de l'équation de Schrödinger et de l'électrodynamique quantique. Ce n'est pas sous cet angle qu'on l'étudie.

problème à N corps, avec un nombre N à la fois beaucoup trop grand (16, 56 à 240) pour qu'on puisse le résoudre exactement sur ordinateur, et trop petit pour qu'on puisse utiliser les méthodes de la physique statistique. Avec les accélérateurs d'ions lourds, on découvre des effets très subtils, par exemple de superfluidité locale lors du choc frontal de deux noyaux lourds.

La physique nucléaire a eu comme sous-produit la physique des particules, des interactions fondamentales et des constituants fondamentaux de la matière : quarks et leptons.

Elle est essentielle pour comprendre l'origine et la structure du monde dans lequel nous vivons. La naissance de l'astrophysique nucléaire a constitué un pas en avant considérable en astronomie et en cosmologie. Bien entendu, les technologies nucléaires jouent un rôle de premier plan dans la société contemporaine. Nous en verrons plusieurs exemples.

Ce livre est principalement un document d'ouverture à des sciences et technologies d'une grande diversité. Il a été suscité par la réflexion qu'ont fait naître les événements dramatiques survenus en mars 2011 au Japon : tremblement de terre de degré 9, tsunami, catastrophe sinon désastre de la centrale nucléaire de Fukushima. Cette catastrophe n'est pas terminée à l'heure où ces lignes sont écrites.

HENRI BECQUEREL : LA DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

L'Académie des sciences se réunit le lundi.

La séance du 24 février 1896 est animée. Arsène d'Arsonval présente la communication hebdomadaire de Gustave Le Bon sur la lumière noire. Ce médecin proclame depuis quatre lundis qu'il a établi que des formes de lumière traverseraient les corps opaques. L'opacité, dit-il, n'existe que pour notre œil imparfait ; construit un peu différemment, celui-ci pourrait voir à travers les murailles. Sonder l'invisible ! Un grand fantasme. Gustave Le Bon dit avoir photographié cette lumière noire. L'Académie a appelé au secours Auguste et Louis Lumière, qui savent ce que photographeur veut dire. L'entreprise familiale produit quinze millions de plaques photographiques par an. Ce 24 février 1896, la note des frères Lumière est polie, mais ferme : « La mauvaise fermeture des châssis photographiques, leur défaut d'étanchéité, sont encore des causes d'erreurs fréquentes, dans les expériences du genre de celles qui nous préoccupent. Nous croyons pouvoir conclure que la lumière noire, dont il a été plusieurs fois question dans les *Comptes rendus*, ne serait que de la lumière blanche,

à l'abri de laquelle on ne se serait pas placé d'une façon suffisamment rigoureuse. »

Et puis, ce même lundi 24 février 1896, on trouve une brève communication d'Henri Becquerel³, aussi attendue que laconique ! Il a soigneusement enveloppé dans du carton noir des plaques photographiques achetées à l'usine Lumière, il a recouvert le tout de sels d'uranium, et l'a exposé au soleil sur le bord de sa fenêtre. Cinq heures plus tard, en développant ses plaques, il s'est aperçu qu'elles étaient impressionnées. Un rayonnement invisible avait traversé le carton. Si l'on interposait des objets métalliques entre le sel d'uranium et la plaque, on voyait leur silhouette se dessiner sur les clichés.

Henri Becquerel a 43 ans. C'est un homme modeste et doux. La communauté scientifique apprécie sa culture, la finesse de son jugement et ses talents d'expérimentateur, mais il apparaît davantage comme un continuateur que comme un créateur. On le connaît surtout comme le troisième membre de la dynastie des Becquerel qui, depuis le début du siècle, se succèdent tant à l'Académie qu'au Muséum.

Son grand-père Antoine-César (1788-1878), après avoir combattu pendant la guerre d'Espagne, s'était lancé dans la physique. Il y a laissé une œuvre considérable, notamment sur l'électricité. Il s'était pris de passion pour la phosphorescence lors d'un voyage à Venise, en découvrant la lagune illuminée par des algues luminescentes. Cette passion l'avait mené jusqu'à élever des vers luisants et à faire une collection de minéraux fluorescents, dont des cristaux d'uranium. Son père, Alexandre-Edmond (1820-1891), avait préféré démissionner de l'École normale supérieure et de l'École polytechnique pour devenir l'assistant de son propre père au Muséum. Il a laissé une œuvre considérable. Passionné par la photographie, il a, le premier, mis en évidence la partie ultraviolette du spectre solaire. C'était l'expert mondial en matière de phénomènes de luminescence, fluorescence et phosphorescence.

À vrai dire, lorsque l'Académie prend connaissance des observations de Becquerel, elle est en effervescence depuis plusieurs semaines. La découverte de la radioactivité est indissociable de celle des rayons X. Le quotidien parisien *Le Matin* du 13 janvier 1896 a, le premier, annoncé au public parisien la découverte faite par Wilhelm Conrad Röntgen, le 8 novembre 1895 à Würzburg, de rayonnements invisibles et pénétrants, qu'il nomme

3. H. Becquerel, « Sur les radiations émises par phosphorescence », *Compt. rend. Acad. sc.*, Paris, **122**, 420 (1896).

de la lettre de l'inconnu : *X-Strahlen*. Röntgen a rédigé une communication provisoire le 28 décembre 1895 pour la « *Physikalische-Medizinische Gesellschaft* » de Würzburg. La communication paraît le 2 janvier 1896. La *Frankfurter Zeitung* annonce en même temps l'événement au public allemand.

Röntgen a découvert ces rayonnements en s'intéressant aux étranges rayons cathodiques qui se propageaient dans le vide à l'intérieur d'un tube de Crookes (ancêtre du tube de télévision). On s'interrogeait beaucoup sur la nature de ces rayons électriques. En 1894, Lenard, constatant que les rayons cathodiques peuvent traverser un hublot métallique placé sur la paroi du tube, décide de les étudier en eux-mêmes, à la sortie. Pour protéger la zone expérimentale de tout rayonnement, il barde le tube et le hublot de feuilles opaques de plomb et d'étain. Röntgen répète ces expériences en suivant la procédure expérimentale de Lenard à un détail près. On ne sait pourquoi, c'est avec du carton noir et non du plomb qu'il enveloppe le tube (on saura plus tard que les rayons X sont arrêtés par le plomb, mais pas par le carton!). Il y a là, loin du tube, un écran enduit sur une de ses faces de platino-cyanure de baryum fluorescent. À sa stupéfaction, à chaque décharge du tube cet écran devient luminescent. Un rayonnement inconnu semble filtrer au travers du carton noir pour aller exciter la fluorescence de l'écran. Röntgen devient fébrile : « C'est une chose tellement extraordinaire qu'on va dire que je suis devenu fou ! » En interposant sa main entre le tube et l'écran, il voit se dessiner les os de ses phalanges, entourés de la pénombre de ses chairs. Les corps sont plus ou moins opaques à ces rayons X. Il enregistre les images sur des plaques photographiques. « J'ai des photos de l'ombre des os de la main, d'un ensemble de poids enfermés dans une boîte. . . » écrit-il. Ces radiographies frappent l'esprit. C'est une révolution inimaginable pour la médecine et le diagnostic médical. En quelques années, les hôpitaux seront équipés. Le Kaiser s'en fera faire une démonstration personnelle.

Revenons à l'Académie. L'effervescence s'y est déclenchée le lundi 20 janvier. Après s'être confortablement assoupis pendant un long exposé de Gabriel Lippmann sur « L'entretien du mouvement des pendules sans perturbations », suivi d'un autre sur « La circulation de l'air dans les sols agricoles », les Illustres sont brusquement arrachés à leurs songes en fin de séance par une intervention du mathématicien Henri Poincaré, sollicité par Alfred Cornu, président de l'Académie, et ses deux secrétaires perpétuels, Joseph Bertrand et Marcelin Berthelot. Poincaré, qui parle

couramment l'allemand, a reçu un exemplaire de l'article de Röntgen avec la photographie. Arsène d'Arsonval lui a confié d'autres photographies envoyées par deux médecins, Paul Oudin et Toussaint Barthélemy, qui ont pu reproduire l'expérience de Röntgen. Il fait circuler ces clichés que les Illustres n'ont jamais imaginés ! On y voit les os à l'intérieur d'une main vivante ! Sur le cliché de Röntgen, la main est celle de sa femme !

En découvrant les photos, l'Académie s'anime. Henri Poincaré est un passionné de physique. Les interrogations fusent. Il y a là Henri Becquerel, qui, fasciné comme son ami Poincaré, se pose quantité de questions, notamment : d'où viennent ces rayons invisibles ? Le soir venu, Poincaré constate que Röntgen le précise dans son article : « Il résulte d'un grand nombre d'essais que les points du tube à décharges où apparaît la phosphorescence la plus brillante, sont le siège principal d'où les rayons X naissent et se propagent dans toutes les directions, c'est-à-dire que les rayons X partent de la région où les rayons de cathode frappent le verre. Que l'on déplace les rayons de cathode dans le tube à l'aide d'un aimant et l'on verra les rayons X partir d'un nouveau point, c'est-à-dire encore de l'extrémité des rayons de cathode. Les rayons X sont émis à l'extrémité opposée à la cathode, là où les rayons cathodiques atteignent le verre et provoquent une vive fluorescence. »

Dans son « Éloge historique d'Henri Poincaré », lu le 15 décembre 1913 à l'Académie, Gaston Darboux insistera sur le fait suivant. « Notre regretté secrétaire perpétuel, Henri Becquerel, se plaisait à répéter que, s'il avait entrepris les travaux qui lui ont valu l'honneur d'être lauréat du prix Nobel, et qui ont ouvert aux physiciens tout un ordre de recherches, c'est à la suite de la lecture d'un article de la *Revue générale des Sciences*, de Poincaré. » Dans cet article, paru le 30 janvier 1896, on lit : « Ainsi, c'est le verre qui émet les rayons Röntgen et il les émet en devenant fluorescent. Ne peut-on alors se demander si tous les corps dont la fluorescence est suffisamment intense n'émettent pas, outre les rayons lumineux, des rayons X de Röntgen, quelle que soit la cause de leur fluorescence ? »

Fluorescence, le mot clé est prononcé ! La phosphorescence, qui persiste plus longtemps, et la fluorescence, d'une durée très brève, sont des émissions lumineuses que certains corps produisent après avoir eux-mêmes été illuminés. Becquerel et Poincaré veulent savoir s'il y a ou non un lien entre les rayons X et la fluorescence.

Ils ne sont pas les seuls. Mais Henri Becquerel est bien placé pour mener à bien cette analyse. Si ses premiers essais sont des échecs, au bout de quelques jours, il pense à utiliser des sels d'uranium. Pourquoi de

l'uranium ? Chance, intuition, la tradition familiale y est pour beaucoup. « Les résultats de Röntgen ne justifiaient pas vraiment cette idée, dira-t-il en recevant le prix Nobel, mais les sels d'Urane possédaient des propriétés de luminescence très extraordinaires, et il était véritablement tentant de procéder à cette investigation. » Il possède une quantité notable de ces composés d'uranium, qui n'étaient jusque-là que des curiosités, sans grande application⁴.

D'où la note du 24 février. Pour qu'un corps devienne luminescent, on doit l'exposer à la lumière. Il faut exposer au soleil l'uranium, mais pas la plaque photographique qui doit détecter les rayons X. Becquerel place, par conséquent, ses plaques photo dans du carton noir, et met les cristaux de sel d'uranium dessus. Après exposition, il constate que les plaques ont été impressionnées, alors que des plaques témoins, sans sels, ne le sont pas. Tout semble confirmer l'idée que les sels d'uranium émettent effectivement des rayons X pendant leur fluorescence.

Pourtant, sa découverte n'est pas là. Sa découverte se produit une semaine plus tard. Il veut répéter son expérience le 26 et le 27 février. Hélas ! Paris est recouvert de nuages. Becquerel abandonne ses échantillons dans un tiroir, remettant son expérience à plus tard. Avant de reprendre ses travaux, le dimanche 1^{er} mars, il développe par acquit de conscience ses plaques photo, dont tout laisse à penser qu'elles sont vierges puisque l'uranium était à l'abri du soleil. À sa stupéfaction, elles sont, au contraire, fortement impressionnées !

Sa communication à l'Académie, le lundi 2 mars⁵, est un coup de théâtre pour ses collègues. Becquerel y laisse percer son émotion. L'impression de ses plaques est totalement indépendante de la fluorescence de l'uranium. Le sel d'uranium émet spontanément des rayons pénétrants, qu'il ait ou non été exposé à la lumière solaire.

Becquerel sent qu'il y a là « un phénomène d'un ordre nouveau ». C'est, en effet, un nouvel ordre de phénomènes. Becquerel prendra progressivement conscience que sa découverte est celle d'un phénomène majeur de la nature ! En deux mois, il parvient à démontrer que les composés d'uranium non fluorescents donnent le même effet, et que les matériaux fluorescents sans uranium ne donnent pas d'effet. Le lundi 18 mai, Henri

4. L'uranium avait été découvert en 1789 par le chimiste allemand Martin Klaproth. On utilisait ses sels comme colorants dans les céramiques. Il acquit une certaine célébrité en occupant la 92^e place du tableau de Mendeleïev.

5. H. Becquerel, « Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents », *Compt. rend. Acad. sc. Paris*, **122**, 501 (1896).

Becquerel annonce que la source de ces « rayons uraniques » pénétrants, comme il les baptise, l'agent « radioactif » (le terme viendra de Marie Curie), c'est l'uranium lui-même.

Becquerel est un expérimentateur. Il a peu de goût pour les théories, les siennes ou celles des autres. Il y a peu de formules dans ses articles. En revanche, la rigueur et la créativité de sa démarche sont étonnantes. Il a en permanence une attitude critique sur ses résultats et ses idées. Il est prêt à abandonner toute spéculation, aussi enthousiasmante soit-elle, face à la réalité des faits.

Au départ, il agit de façon rationnelle pour vérifier une idée logique. Il suppose que les rayons X accompagnent la fluorescence et veut le prouver. Ça marche d'abord admirablement, ce qui, sans sa persévérance, serait resté un exemple, oublié parmi tant d'autres, de la confirmation expérimentale d'une idée fausse.

Et sa découverte survient lorsqu'il démontre que le phénomène qu'il a imaginé n'existe pas ! La première découverte de Becquerel est qu'un phénomène n'existe pas. Il en découvre alors un autre : la radioactivité. Il a tourné le dos à la phosphorescence familiale.

On se pose évidemment la question de savoir pourquoi il a éprouvé le besoin de développer des plaques vierges. Pourquoi ce geste ? Goût du détail, inspiration géniale ? Crookes, qui était venu lui rendre visite ce dimanche 1^{er} mars, est admiratif, comme il l'écrira en 1910 dans les comptes rendus de la Royal Society : c'est le réflexe d'un grand physicien. Becquerel s'attendait à trouver un faible effet : la phosphorescence disparaît progressivement, c'était une bonne occasion d'estimer l'émission évanescence. On mesure combien ce geste heureux a pu être jalosé par certains contemporains qui, sans doute, se jugeaient plus dignes de bénéficier de la main de la Providence. Mais la découverte des rayons X par Röntgen n'avait-elle pas été aussi chanceuse, lorsque le carton noir avait remplacé du plomb ? Ces deux découvertes imbriquées de la physique sont peut-être celles dont les répercussions ont été les plus fortes sur le monde du xx^e siècle avant la découverte du transistor.

Entre le printemps 1896 et la fin de 1897, Becquerel perd progressivement son intérêt pour ses rayons. Le deuxième souffle vient, à partir de 1898, lorsque Pierre et Marie Curie s'intéressent à leur tour au phénomène et découvrent et isolent le polonium et le radium, dont les rayonnements sont un million de fois plus intenses que ceux de l'uranium. Henri Becquerel se lie aux Curie. Il les aide, présente leurs communications à l'Académie des sciences, leur apporte son appui. Pierre et Marie Curie lui prêtent du

radium, avec lequel il fait de nouvelles expériences. Deux résultats sont à retenir.

À la fin de 1899, ayant en tête ses premiers travaux, il veut étudier l'effet d'un champ magnétique sur les rayonnements du radium. Une fois encore, il fait volte-face par rapport à son idée de départ. Il constate qu'une partie des rayonnements radioactifs sont porteurs d'électricité, ce qu'aucun rayonnement spontané n'a jamais manifesté. Avec un collimateur, il fabrique des faisceaux de rayons et mesure leur déflexion par un champ magnétique. C'est ce qu'a fait Thomson deux ans plus tôt quand il a prouvé que les rayons cathodiques étaient des faisceaux d'électrons. Le 26 mars 1900, Becquerel démontre que les rayons du radium sont déviés de la même façon que les rayons cathodiques de Thomson. Il vient de réaliser la première détection moderne d'une particule élémentaire en identifiant le rayonnement bêta comme une émission d'électrons.

Le second point concerne l'énergie dégagée. Depuis ses premières découvertes, Becquerel s'est posé la question de savoir quelle était la source d'énergie responsable de ce nouveau rayonnement. Pierre Curie est le premier à voir que cette énergie est considérable ; il mesure que le radium dégage une énergie colossale, un million de fois supérieure à toute énergie de combustion connue. C'est la première reconnaissance de l'énergie nucléaire. Cela attirera l'attention du public et des médias. En 1904, le *St Louis Post Dispatch* écrit : « Un grain du mystérieux radium sera montré à l'Exposition universelle. Sa puissance est inimaginable. Avec ce métal, tous les arsenaux du monde pourraient être détruits. Il pourrait rendre la guerre impossible ! »

Les effets biologiques de ce dégagement d'énergie sont d'abord observés par Becquerel, encore une fois par « chance ». Pierre Curie lui a prêté un échantillon de radium, dans une ampoule scellée ; Becquerel met l'ampoule dans sa poche. Au bout de quelques heures, il constate une rougeur, qui se transforme en quelques jours en une plaie, semblable à une brûlure. La blessure tarde à cicatriser ; il y a une nécrose des tissus. Lorsqu'il fait part de cette observation à Pierre Curie, ce dernier fait l'expérience, sur lui-même et sur son épouse, et procède à des expériences plus avancées sur des cobayes. Bientôt, tous les physiciens du domaine se livreront à ce jeu dangereux. La radiothérapie vient de naître ; Becquerel et Curie publieront ensemble sur ce sujet en 1901.

En 1903, le prix Nobel de physique est décerné pour moitié à Henri Becquerel, pour moitié à Pierre et Marie Curie, pour la découverte de la radioactivité. Becquerel avait découvert ce phénomène majeur, les

Curie en avaient montré l'importance et l'étendue. Henri Poincaré fut proposé plusieurs fois pour le prix Nobel, notamment pour la relativité, avant sa mort prématurée en 1912. Le destin de la radioactivité a associé Poincaré, immense mathématicien passionné de physique, et Becquerel, exceptionnel expérimentateur.

Le destin a placé Henri Becquerel à plusieurs charnières de l'histoire. Tout d'abord, la découverte de la radioactivité est un tournant exceptionnel parce qu'elle ouvre la voie à la physique nucléaire, à l'énergie nucléaire, à la structure intime de la matière et à la physique des particules élémentaires. C'est Rutherford, Prix Nobel de chimie 1908, qui, en s'intéressant à ces phénomènes à partir de 1899, sera le fondateur de la physique nucléaire proprement dite. En 1911, Rutherford établit l'existence des noyaux atomiques, et nomme proton, « premier », le noyau d'hydrogène, le plus léger. Il comprend qu'il doit exister un « proton neutre » ou neutron, identifié par Chadwick en 1932. En 1934, Fermi découvre la capture des neutrons par les noyaux.

Charnière de la physique, c'est aussi une charnière de l'histoire du monde. En décembre 1938, quelques mois avant le déclenchement de la Seconde Guerre mondiale, Hahn et Strassman découvrent la fission nucléaire. Frédéric Joliot, au début de 1939, comprend les réactions en chaîne, la possibilité de produire de l'énergie nucléaire et de fabriquer des armes nucléaires. En 1939, Joliot dépose, avec von Halban et Kowarski, une série de brevets sur la production et l'utilisation de l'énergie nucléaire. Il obtient l'achat par la France du stock mondial d'eau lourde en Norvège ; elle sera emmenée à Londres en juin 1940 par von Halban et Kowarski. Le 2 décembre 1942, le premier réacteur nucléaire, construit par Fermi, diverge à Chicago. La réussite de cette expérience marque le démarrage, au plan scientifique, de ce que l'on devait appeler le « projet Manhattan », décidé par le président Roosevelt le 16 décembre 1941. Le 16 juillet 1945, le premier engin atomique de l'histoire, une bombe au plutonium, était testé près d'Alamogordo dans l'État du Nouveau-Mexique. Les deux bombes suivantes, l'une à l'uranium et l'autre au plutonium, furent larguées respectivement sur les villes japonaises d'Hiroshima, le 6 août, et de Nagasaki, le 9 août 1945.

