

### ÉTAT DES LIEUX À LA FIN DU XIX<sup>ÈME</sup> SIÈCLE

Les scientifiques du XIX<sup>ème</sup> siècle ont accumulé nombre de connaissances sur le monde macroscopique : la chimie, l'électromagnétisme, l'optique. En 1896, la découverte de la radioactivité ébranle ce solide édifice de connaissances, et élargit le champ des investigations ; ses effets s'étendent vers toutes les disciplines scientifiques, en médecine, en biologie, en géologie et, bien sûr, en physique.

Pendant la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, on commence à accepter les notions d'atome et de molécule, et le chimiste russe Dimitri Mendeleïev propose sa classification périodique des éléments. La mécanique classique atteint un haut degré de perfection : en 1846, Urbain le Verrier montre par le calcul, à partir d'irrégularités dans l'orbite d'Uranus, qu'il existe une autre planète, Neptune.

Des progrès sont également faits en électromagnétisme : Michaël Faraday découvre l'induction électromagnétique en 1831, et l'électrolyse en 1833-1834. James Maxwell unifie en 1864 la description des phénomènes électriques et magnétiques au moyen de ses célèbres équations. Celles-ci impliquent l'existence d'ondes électromagnétiques, dont Heinrich Hertz révélera expérimentalement l'existence en 1888.

L'optique se développe également : Augustin Fresnel étudie les phénomènes d'interférence et de diffraction ; Hippolyte Fizeau propose une mesure de la vitesse de la lumière (1849) ; Bunsen et Kirchhoff (1859) développent l'analyse spectrale, qui associe la présence d'un élément chimique à chaque raie lumineuse d'un spectre optique. On découvre alors de nouveaux éléments sur Terre et dans le Soleil.

Enfin, dès le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, le Français Sadi Carnot édifie la thermodynamique. En 1847, Hermann von Helmholtz énonce le principe de conservation de l'énergie. A partir de 1851, William Thomson (futur Lord Kelvin) fonde la théorie thermodynamique. En 1877, Maxwell et Boltzmann admettent que les gaz sont constitués d'atomes et de molécules obéissant à des lois statistiques ; ils élaborent ainsi la théorie cinétique des gaz.

Jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'atome est une interprétation satisfaisante pour expliquer les propriétés globales de la matière en chimie et en physique. Toutefois, on ne connaît ni ses dimensions, ni sa nature. Brusquement, de 1895 à 1898, cinq découvertes ouvrent un accès vers les caractéristiques de ces grains élémentaires : entre novembre et décembre 1895, à Würzburg, en Allemagne, Conrad Röntgen découvre les rayons X ; en mars 1896, à Paris, Henri Becquerel révèle la radioactivité de l'uranium ; en août 1896, à Leyden, Pieter Zeeman observe le dédoublement, sous l'action d'un champ magnétique, des raies émises par les atomes ; en 1897, à Cambridge, Joseph Thomson établit l'existence de l'électron ; entre juillet et décembre 1898, à Paris, Pierre et Marie Curie isolent le polonium et le radium.

Le 20 janvier 1896, à l'Académie des Sciences de Paris, Henri Poincaré présente les résultats de Röntgen et des clichés illustrant les propriétés des rayons X. Il pense que l'émission des rayons X est associée à la luminescence de la paroi de verre dont ils sont issus. L'un des académiciens présents, Henri Becquerel, est justement un spécialiste de la luminescence et de la phosphorescence : la luminescence est une émission de lumière sous l'effet d'une excitation, et dans la phosphorescence, cette émission perdure quelque temps après l'arrêt de l'excitation. Becquerel entreprend de chercher d'autres substances luminescentes émettrices de rayons X. Il choisit des cristaux de sulfate double d'uranyle et de potassium. Vers le 20 février, il place ce sel sur une plaque photographique enveloppée de papier noir épais, et il expose le tout au Soleil pendant plusieurs heures (le papier noir empêche la lumière solaire d'atteindre directement la plaque mais n'arrête pas les rayons X éventuellement émis par les cristaux). Il développe la plaque et reconnaît la silhouette de la substance phosphorescente. Ainsi, il confirme l'hypothèse de Poincaré selon laquelle les rayons émis traversent les feuilles de papier noir, mais également des plaques d'aluminium et une mince feuille de cuivre.

A la suite d'un hasard météorologique, Becquerel fait une observation plus surprenante : "quelques-unes de ces expériences avaient été préparées le mercredi 26 et le jeudi 27 février et comme ces jours-là le Soleil ne s'est montré que par intermittences, j'avais conservé les châssis à l'obscurité dans le tiroir d'un meuble, en laissant en place les lamelles d'uranium. Le Soleil ne s'étant pas montré les jours suivants, j'ai développé les plaques photographiques le premier mars, en m'attendant à trouver des images très faibles. Les silhouettes apparurent, au contraire, avec une grande intensité. Je pensai aussitôt que l'action avait dû continuer à l'obscurité..." L'émission de ces rayons ne nécessitait donc pas de lumière solaire. Le 18 mai, constatant que l'intensité de l'émission reste la même après deux mois, Becquerel énonce un nouveau résultat important : les sels d'uranium non phosphorescents émettent également ce rayonnement. Il écrit : "j'ai donc été conduit à penser que cet effet était dû à la présence de l'élément uranium dans ces sels, et que le métal donnerait des effets plus intenses que ses composés. L'expérience a confirmé cette précision." Becquerel a ainsi établi une nouvelle propriété d'un corps naturel, l'élément uranium, qui émet spontanément un rayonnement pénétrant.

En septembre 1897, Marie Curie commence un travail de thèse sur les rayons de Becquerel. Cherchant si d'autres substances que l'uranium émettent spontanément des rayonnements ionisant l'air, elle met en évidence l'activité du thorium, découvre le polonium (du nom de son pays d'origine), puis le radium. À poids égal, le radium rayonne 1,4 millions de fois plus que l'uranium. C'est le plus actif des radio-éléments alors connus. Il est très rare, puisqu'il existe un gramme de radium pour 2,8 tonnes d'uranium. Les rayonnements du radium de révèlent un formidable outil pour l'exploration de la structure microscopique de la matière. Les applications à la médecine, notamment en radiothérapie, commencent dès la fin de 1901, à l'initiative de Pierre Curie. L'utilisation de l'énergie nucléaire débute dans les années 1940.

#### RADIOACTIVITÉ NATURELLE

La radioactivité a principalement pour origine les radioisotopes existants dans la nature et produits lors des explosions des supernovas. On trouve des traces de ces éléments radioactifs et de leurs descendants dans notre environnement : un roc de granite contient des traces d'uranium qui, en se désintégrant, émettent du radon.

On parle de "radioactivité naturelle" pour désigner la radioactivité due à des sources non produites par les activités humaines, comme celle issue du radon, ou du rayonnement cosmique. *A contrario*, on parle de "radioactivité artificielle" pour désigner la radioactivité due à des sources produites par les activités humaines : éléments transuraniens synthétiques, concentrations artificiellement élevées de matières radioactives, production artificielle de rayonnement  $\gamma$  (dans un accélérateur de particules par exemple) ou de rayons X (radiographies).

Physiquement, il s'agit exactement du même phénomène.

La radioactivité naturellement présente dans les roches telluriques est la source unique de chaleur dans le cœur de la Terre. Grâce à elle, la surface de la Terre se trouve à une température à laquelle l'eau est à l'état liquide, une température donc propice à la vie. Quand la réserve de composés radioactifs terrestre sera épuisée, la Terre deviendra un astre glacé, comme la Lune qui a déjà épuisé sa propre réserve.

#### ORIGINE DE LA RADIOACTIVITÉ AMBIANTE

Radon (gaz radioactif naturel présent dans l'air) :	42%
Irradiation d'origine médicale (radiographies, scanners, radiothérapies,...)	20%
Éléments radioactifs naturellement présents dans l'alimentation (surtout <sup>40</sup> K)	16%
Rayons cosmiques	13%
Rayonnement interne	6%
Autres origines artificielles autres que l'énergie nucléaire civile (industries minières, instruments de mesure, retombées atmosphériques des essais militaires,...)	3%
Énergie nucléaire civile	0,3%
Enfin, 77% de la radioactivité reçue par l'être humain sont d'origine naturelle, contre 23% d'origine artificielle.	

#### PREMIÈRE APPLICATION HISTORIQUE : LA MÉDECINE

Les rayons X ont été découverts en décembre 1895 et ont été immédiatement utilisés pour "voir à travers le corps humain". Pierre Curie a été l'un des premiers à penser, en 1901, que les rayons des corps radioactifs, en particulier ceux du radium provoquant des brûlures, pouvaient être utilisées à des fins thérapeutiques, parallèlement aux rayons X.

Les cellules cancéreuses en voie de prolifération sont plus sensibles aux rayonnements que les cellules saines : c'est le fondement de leur utilisation dans le traitement des tumeurs.

L'imagerie nucléaire et l'utilisation d'isotopes radioactifs ont révolutionné la médecine et les sciences du vivant en apportant des images de l'intérieur du corps humain et de son

fonctionnement. Pour obtenir une image, on introduit dans l'organisme en très petite quantité un produit radioactif se fixant sélectivement sur l'organe à explorer et émettant soit des rayonnements gamma (détecteur : gamma-caméra), soit des positons (détecteur : caméras TEP, pour *tomographie par émission de positons*, aussi appelé PET-scan en anglais). Un système de détection très sensible observe les photons émis, soit directement par les atomes radioactifs, soit lors de l'annihilation du positon avec un électron de l'organe.

#### LES RÉACTEURS

Le premier réacteur nucléaire a été construit en 1942 à Chicago par Enrico Fermi. Constitué d'un empilement de 6 tonnes d'uranium métallique, de 34 tonnes d'oxyde d'uranium et de 400 tonnes de graphite, il porte le nom de *pile atomique*. Grâce à ce réacteur, Fermi a vérifié la divergence du mécanisme de fission. Ce réacteur fut le pilote pour les réacteurs destinés à la production de plutonium, nécessaire à la bombe atomique développée dans le cadre du projet Manhattan.

En France, la première réaction en chaîne de la *Pile Zoé* a lieu en 1948. L'URSS développe aussi des réacteurs RBMK. Dans les deux cas, il s'agit également de produire du plutonium à des fins militaires.

La mise en service du réacteur d'Obninsk en 1954, puis du réacteur G1 au CEA en 1956, amorce l'ère du nucléaire électrogène. La filière française basée sur l'utilisation de l'UNGG (Uranium naturel graphite gaz), première génération, sera ensuite remplacée par la technologie à eau pressurisée (REP), deuxième génération.

La troisième génération de réacteurs est dérivée de la seconde, et devrait la remplacer à partir de 2010. Le projet européen EPR en fait partie.

La quatrième génération de réacteurs devrait entrer en service à l'horizon 2030. Les réacteurs Phénix et Superphénix en sont des prototypes, mais plusieurs technologies de réacteurs sont encore à l'étude.

À l'heure actuelle, tous les réacteurs nucléaires sont basés sur des réactions de fission nucléaire. Aucune technologie de fusion nucléaire (comme dans le Soleil) n'est actuellement viable.

#### USAGE MILITAIRE

Dès 1940, Edward Teller entrevoit la possibilité d'utiliser l'énorme puissance thermique produite par l'explosion d'une bombe à fission pour déclencher le processus de fusion nucléaire ( $10^8$  °C). C'est le principe de la bombe H. Celui de la bombe A est d'utiliser l'énergie de la fission nucléaire.

Au cours de la Seconde Guerre Mondiale, les États-Unis ont mené un projet de recherche, dont le nom de code était *projet Manhattan*. Ce projet, sous la direction de Robert Oppenheimer, fut lancé en 1942 pour devancer un projet nazi similaire. Il conduisit à la conception, la production et l'explosion de trois bombes atomiques de type A : Trinity (bombe au plutonium, testée le 16 juillet 1945 dans le désert du Nouveau-Mexique), Little Boy (bombe à l'uranium larguée sur Hiroshima le 6 août 1945) et Fat Man (bombe au plutonium larguée sur Nagasaki le 9 août 1945). Une quatrième bombe était prévue, au cas où les deux précédentes n'auraient pas suffi à faire renoncer les Japonais.