

Eau, radioactivité naturelle et indices radioactifs

MICHEL KARATCHENTZEFF

Fondation Louis de Broglie, 23, rue Marsoulan, 75012 Paris, France

JACQUES PRADEL

Ancien président de la Société Française de Radioprotection

Avertissement, copyright

Michel Karatchentzef © 2002

Ce document est publié en l'état dans l'espoir qu'il sera lu et est placé sous la *Public General License*, version 2.0 ou ultérieure, dont l'ensemble¹ des caractéristiques se trouve à l'adresse

<http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>

La seule version réputée valable de ce document est celle que l'on trouve sur le site

<http://MichelKaratchentzeff.free.fr>

et peut-être modifiée sans préavis.

TEX est une marque déposée de l'*American Mathematical Society*.

¹ Dans les grandes lignes, ce document peut être librement redistribué et modifié, sans réserve, tant que cette licence ne change pas, mais l'original doit être cité ainsi que ses auteurs. De plus, il n'est apporté **aucune** garantie, d'aucune sorte et pour tout usage, quant aux conséquences d'une utilisation malheureuse du présent document, ce qui veut dire en particulier que rien ne peut être réclamé à l'auteur ou à ses collaborateurs, quelque soit le résultat obtenu en l'utilisant.

1. Sommaire.

La radioactivité apparaît lors de la création des atomes, c'est-à-dire aux tout premiers instants de la création de l'Univers, si l'on en croit la théorie du Big Bang. Celle des premières molécules d'eau, de méthane, d'ammoniac ... a rapidement suivi. Ensuite a démarré, au hasard des fluctuations de la matière, le long processus aboutissant à la formation des étoiles et, dans certains cas, des planètes comme la nôtre où, petit à petit, l'eau et la radioactivité ont pris leur part dans l'élaboration de la vie telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Le but de cet article est de faire prendre conscience que l'eau et les phénomènes découlant de l'existence de la radioactivité sont intimement mêlés et peuvent être étudiés simultanément avec profit.

Pour cela,

- sans chercher à être exhaustifs, nous commencerons par rappeler (section 2) un certain nombre de propriétés physiques ou chimiques de l'eau qui montrent combien ce corps, qui nous est familier, est tout à fait exceptionnel dans notre environnement ;
- nous ferons ensuite (section 3) quelques remarques sur l'abondance relative de l'eau, ou de ses constituants, dans l'Univers ou sur notre planète par rapport aux autres éléments, et en particulier par rapport à l'uranium, que nous avons choisi pour illustrer les phénomènes radioactifs ;
- puis (section 4), nous nous tournerons vers les propriétés de ce dernier, parlant évidemment de ses propriétés radioactives, mais aussi des dépendances de son minerai avec l'eau par l'intermédiaire de ses propriétés chimiques ;
- nous regarderons ensuite (section 5) le cycle particulier que parcourent les descendants de l'uranium lorsque l'un d'entre eux, le radon, vient à rompre la suite d'équilibres radioactifs du minerai pour créer un nouveau cycle qui met en évidence un élément, le polonium 210, dont les caractéristiques en font un élément clé pouvant servir de repère, c'est-à-dire d'indice radioactif ;
- nous montrerons enfin (section 6) comment cet indice, le polonium 210, intervient dans le cycle alimentaire de l'homme ; nous étudierons la part qui lui revient dans le calcul des doses naturelles reçues par l'homme, part que nous comparerons à certaines de celles dues à la radioactivité artificielle, c'est-à-dire engendrées par les activités de l'Homme.

Dans cet exposé, nous souhaitons montrer que cet élément, le polonium 210, qui accompagne le régime alimentaire de l'homme depuis sa création, fournit un repère naturel qui permet d'envisager les problèmes auxquels nous a conduit la radioactivité artificielle avec un autre regard. Et c'est cette attitude, qui nous paraît beaucoup plus constructive, qui est proposée à la réflexion des lecteurs.

2. Quelques propriétés exceptionnelles de l'eau.

Comme nous sommes accoutumés à vivre dans un environnement où l'eau apparaît sous de nombreuses formes, nous ne prêtons plus attention à certains de ses comportements qui nous paraissent normaux, alors que dans la nature, ce sont des exceptions. Citons en quelques uns en faisant remarquer que l'ordre choisi n'a aucune importance :

- *L'eau augmente de volume lorsqu'elle passe de l'état liquide à l'état solide.*

Seuls le bismuth et le gallium font de même ; tous les autres corps diminuent de volume dans les mêmes conditions. Et c'est ce qui permet à l'eau, l'hiver, de

- faire éclater les pierres poreuses ou les bouteilles,
- fendre les blocs de granit,
- desceller les pierres des murs,
- geler au printemps les jeunes pousses gorgées de sève,
- faire flotter les icebergs sur les mers ou les glaçons dans les verres,
- ...

Autre conséquence de cette propriété : la température de fusion de la glace diminue lorsque la pression augmente. C'est ce que traduit l'expérience bien connue du fil de fer fortement lesté et qui, à la longue, traverse un bloc de glace sans que ce dernier ne soit coupé.

La thermodynamique symbolise cet effet par la formule de Clapeyron qui relie la chaleur de fusion d'un corps L_F , la température T , la pression p et les volumes spécifiques u_l du liquide et u_s du solide :

$$L_F = \frac{T}{J} (u_l - u_s) \frac{dp}{dT}$$

Le produit de la différence entre les volumes spécifiques et la dérivée de la pression doit rester positif. Comme le volume du solide est supérieur au volume liquide, la pente de la pression en fonction de la température doit être négative aussi. Il est aisé de vérifier également qu'il faut une forte pression pour une faible variation de la température².

Un fil de fer lesté pourra la fournir. C'est cette même propriété qui explique pourquoi on peut glisser sur la glace avec des patins ou comment les glaciers peuvent avancer sous leur propre poids. On peut de même fabriquer des lentilles de glace d'indice très homogènes par compression de glace pilée.

- *La chaleur latente de fusion de l'eau est très importante.*

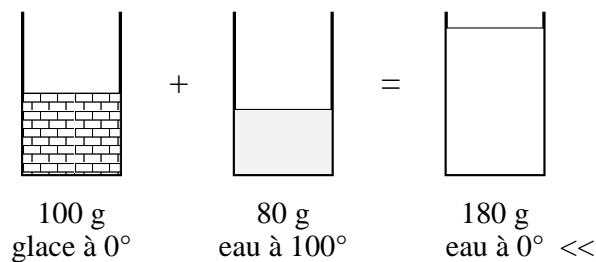
La chaleur latente de fusion est la quantité de chaleur qu'il faut apporter à pression et température constante à l'unité de masse du corps pour le faire fondre. C'est elle qui intervient dans la formule de Clapeyron et vaut pour l'eau 79,7 calories par gramme, soit environ 80 calories par gramme.

La signification physique de cette chaleur est mise en évidence par l'expérience illustrée par la figure 1.

² De $u_l = 1$, $u_s = 1,09$, $L_F = 79,7$ calories par gramme, $T = 273$ kelvin et $J = 4,18$ joules par calorie = $4,18 \cdot 10^7$ C.G.S., on déduit

$$\frac{dp}{dT} = -135,6 \cdot 10^6 \text{ baryes par degré}$$

soit donc pour une atmosphère (= 76 cm de mercure) = $1,013 \cdot 10^6$ baryes, une variation de température de 0,007 degré.

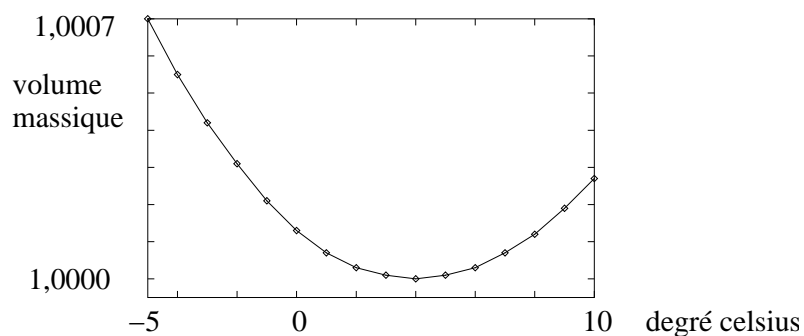
Figure 1. Interprétation expérimentale de la notion de chaleur latente

Si on mélange 100 g de glace à 0° avec 80 g d'eau bouillante (en réalité 79,7 g), on obtient 180 g d'eau à 0°. La chaleur des 80 grammes d'eau bouillante a uniquement servi à faire fondre la glace. Il faut donc beaucoup d'eau très chaude pour peu réchauffer de glace.

- *La courbe de densité de l'eau en fonction de la température est exceptionnelle.*

Sa densité dépend de la température et présente un maximum vers 4 degrés celsius. Son volume massique, qui est proportionnel à l'inverse de la densité, montre donc un minimum au voisinage de la même température. Un *extremum* permettant des mesures plus précises, c'est à cette température que les physiciens ont choisi de rapporter la définition du litre (volume correspondant à la masse d'un kilogramme d'eau à la température de sa densité maximum).

Ce maximum de densité a pour conséquence un comportement étonnant de l'eau lorsqu'on la refroidit à partir de sa surface. Comme tous les corps, elle s'alourdit, ce qui entraîne progressivement les parties froides vers le fond. Ce phénomène se poursuit jusque vers 4° celsius, température à partir de laquelle les parties encore plus froides ont une densité qui commence à décroître. Elles se maintiennent donc au dessus de celles qui sont à 4° celsius, y compris lorsque la température s'abaisse en dessous de celle de congélation. C'est la raison pour laquelle dans les régions froides, lorsque fleuves, étangs ou lacs gèlent, subsiste sous la glace une couche d'eau à 4° dans laquelle la faune et la flore peuvent survivre. Pour que cette couche gèle à son tour, il faudrait que le sol sous l'eau gèle à son tour à partir des rives, ce qui est beaucoup plus rare, car la terre est un fort mauvais conducteur de la chaleur.

**Figure 2.** Le volume massique de l'eau en fonction de la température.

La première explication de ce phénomène fut faite par Thomas Charles Hope (1805) qui décrivit une suite d'expériences mettant en évidence ces propriétés.

- À l'échelle de la Terre, le potentiel de régulation de l'eau est exceptionnel.

En effet, la Terre ne reçoit pas de façon uniforme sur toute sa surface l'énergie qui lui provient de l'espace. De plus, elle ne l'absorbe pas de façon uniforme. La Terre est donc en continuel déséquilibre thermodynamique et cherche aussi continuellement à se rééquilibrer principalement par des mouvements de convections auxquels l'eau participe de façon prépondérante :

- vents, pluies, tempêtes, ouragans, courants marins, ...
- ruissellements, ravinements, écoulements, humidifications, ...

- L'eau est le seul produit hydrogéné liquide dans le voisinage de l'oxygène sous les conditions usuelles de température et de pression.

Cette phrase nécessite une explication. Si l'on considère sur le tableau des éléments de Mendéléév, ceux qui entourent l'élément oxygène

C	N	O	F
Si	P	S	Cl

se combinent avec l'hydrogène pour donner :

CH ₄	NH ₃	OH ₂	FH
SiH ₄	PH ₃	SH ₂	ClH

Or de tout ces corps, dans les conditions usuelles de température et de pression, seule l'eau est liquide, les autres sont gazeux.

On ne retrouve pas nécessairement ce comportement ailleurs dans l'univers. Comme montre la figure 3, la planète Jupiter contient elle aussi de l'eau, du méthane, de l'ammoniaque, ... , mais ces corps s'y trouvent à l'état solide, comprimés par une énorme masse d'hydrogène et d'hélium.

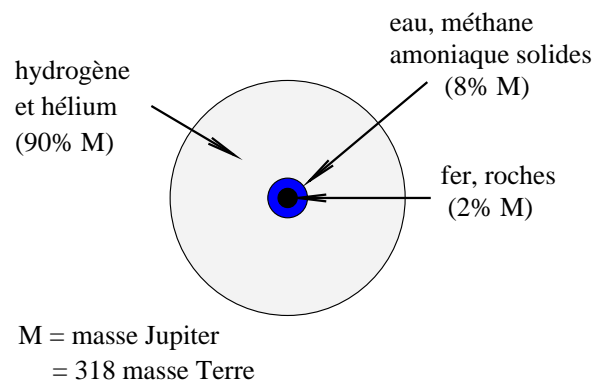


Figure 3. Composition schématique de la planète Jupiter.

- La structure moléculaire de l'eau est remarquable.

Les atomes d'hydrogène de la molécule d'eau sont placés aux extrémités d'un tétraèdre régulier dont l'atome d'oxygène occupe le centre. Les deux sommets restés libres sont siège de phénomènes qui prédisposent des liaisons avec d'autres atomes. Si ces atomes sont des atomes d'hydrogène d'une autre molécule d'eau, il se construit de proche en proche un réseau dont la structure ressemble à celle du diamant, le plus dur de tous les corps et confère au réseau de molécules une extraordinaire stabilité. La liaison entre les molécules d'eau, la liaison hydrogène, est moins forte que la liaison carbone, mais combinée avec les distances inter-atomiques de la molécule d'eau, mais elle est responsable des propriétés précédentes.

Lorsque les molécules d'eau se combinent avec d'autres corps, elles peuvent

- former des agrégats, comme par exemple les nuages artificiels qui se développent à la sortie des moteurs d'avion par condensation de la vapeur d'eau autour des particules de suies non brûlées émises (Picaud et al., 2002). Selon ces auteurs, de tels nuages contribuent à l'effet de serre en participant à la destruction de la couche d'ozone ou en retombant à la pollution des sols par des pluies acides.
- dissoudre de nombreux sels en participant, comme nous le verrons par la suite à la dissémination et à la reconcentration de minerais. C'est par cumul de sels dissous que les rivières salent l'eau de mer.

- *L'eau ralentit les neutrons.*

Ce phénomène, connu depuis les débuts de la physique nucléaire, a été utilisé dans certains réacteurs nucléaires (ou piles atomiques) pour en améliorer le rendement. Les neutrons créés lors de la fission de l'uranium sont en effet trop énergétiques pour produire efficacement d'autres fissions sur d'autres atomes d'uranium ; on peut les ralentir en plaçant l'ensemble dans de l'eau. On peut augmenter le rendement de ce ralentissement en utilisant une eau dont un (faible) pourcentage d'atomes d'hydrogène est remplacé par des atomes de son isotope, le deutérium (un proton, un neutron) et qu'on appelait « eau lourde ». Ce fut par exemple le cas pour la première pile atomique française, ZOÉ. Depuis, on a souvent préféré utiliser de l'uranium dont on avait enrichi le pourcentage naturel de son isotope 235.

On se sert également de cette propriété pour conserver dans des piscines des éléments hautement actifs avant de les traiter.

Il ne faut pas oublier non plus que l'Homme, étant aux trois quart composé d'eau, sera sensible à ce type de rayonnement.

Pour conclure ce paragraphe, il ne semble donc pas exagéré de dire que l'eau est par rapport aux autres corps une véritable exception qui participe à la régulation thermique de la Terre et qui, sous forme liquide, est nécessaire au principe de la vie, et même de la survie.

3. Abondance de l'eau.

L'abondance d'un élément est *a priori* le pourcentage de cet élément que l'on retrouve dans un volume de matière donné. L'abondance de l'eau sera donc directement liée à l'abondance de ses constituants, l'hydrogène et l'oxygène. Ce qui ramène cette étude

à celle de l'abondance des éléments du tableau de Mendéléev. Il est tout à fait remarquable que, sur Terre, si l'on prend un volume suffisamment grand, la courbe donnant la distribution des éléments reste la même, quel que soit l'échantillon.

Il est encore plus remarquable que, si l'on étend ce type de mesure partout où cela est possible dans l'Univers (météorites, Soleil, planètes, étoiles, poussières interplanétaires ...), on trouve encore aux erreurs expérimentales près et à l'exception fondamentale de l'hydrogène et de l'hélium, la même courbe de distribution que sur la Terre. Cette courbe, tracée sur la figure 4 où l'on a porté en ordonnée le logarithme des abondances et en abscisse le numéro atomique Z des éléments (c'est-à-dire leur nombre d'électrons ou de protons) montre tout d'abord que l'Univers semble être essentiellement composé d'hydrogène (55%) et d'hélium (44%), le reste (1%) étant réparti entre la totalité des autres éléments du tableau de Mendéléev).

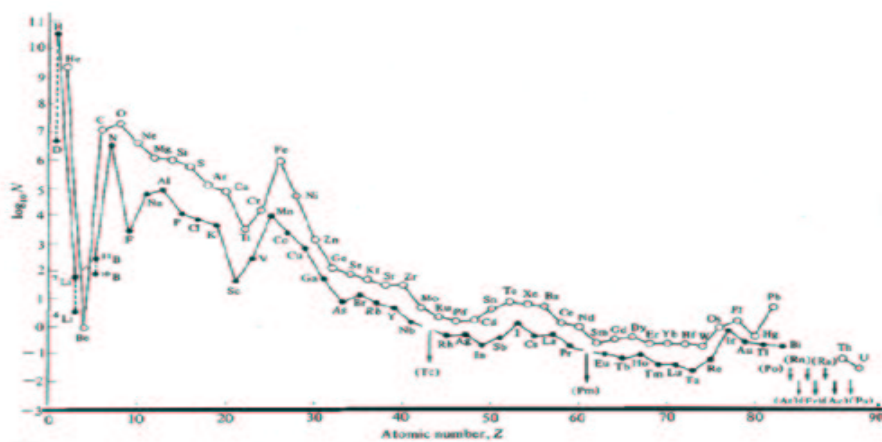


Figure 4. Abondance des éléments dans l'Univers d'après Greenwood – Ernschaw (1984).

Cette courbe montre également que les éléments lourds (numéro atomique $Z > 40$) ont à peu près la même abondance, en particulier, et nous allons bientôt y venir, l'élément naturel le plus lourd, l'uranium, a la même abondance que les autres. Il ne sera donc pas étonnant de le retrouver partout.

Bien d'autres choses peuvent être dites à propos de cette courbe, mais ce qu'il faut surtout retenir, c'est que, comme on la retrouve à partir de mesures indépendantes (Soleil, poussières interstellaires ...), elle semble marquer une propriété fondamentale de l'Univers, et toute théorie de l'Univers se doit de la retrouver.

En ce qui concerne notre modeste planète, la Terre, son déficit en hydrogène s'explique par la faible profondeur des océans vis à vis du rayon terrestre et se justifie dans les théories de formation des petites planètes du système solaire (Gamow, 1961).

4. L'uranium.

Bien des corps sont radioactifs, mais si nous avons choisi de parler de l'uranium, c'est parce que c'est l'un des plus connus et que ses rapports privilégiés avec l'eau nous paraissent dignes d'être soulignés et mieux connus.

BREF RAPPEL HISTORIQUE :

L'histoire associée à l'uranium comporte elle-même des enseignements que nous allons brièvement esquisser, mais qu'il est facile de compléter (Goldschmidt, 1987). Elle débute dans une petite vallée de la Bohême, près de la Saxe, qui vit se dérouler après la découverte d'une veine argentifère une fantastique « ruée vers l'argent » au début du XVI^e, développant la ville de Joachimsthal et faisant à l'époque de cette région le plus grand centre minier d'Europe. On frappait des pièces d'argent appelées « joachimsthalers », nom qui fut par la suite abrégé en « thalers » avant de donner naissance au mot « dollars ».

Comme toujours, cette période brillante, mais dangereuse³, ne dura pas⁴, mais on essaya de gérer le déclin : on créa à Joachimsthal la première école des mines pour améliorer les techniques d'extraction, ce qui permit d'entretenir une certaine activité jusqu'à la fin du XVIII^e.

C'est au cours de cette période que les mineurs, creusant des galeries de plus en plus profondes, trouvèrent de plus en plus fréquemment un minerai noir dont la présence paraît incompatible avec celle de l'argent et lui donnèrent le nom de pechblende, c'est-à-dire minerai portant la poisse ou minerai noir comme la poix, et qu'ils étaient obligés d'évacuer. Et c'est en analysant ces déchets que Martin Heinrich Klaproth, autodidacte, ancien commis pharmacien et ardent défenseur des thèses controversées de Lavoisier, découvrit en 1789 un corps auquel il donna le nom d'uran, rendant ainsi hommage à son compatriote Guillaume Herschell qui s'était rendu célèbre par la découverte d'une nouvelle planète qu'il avait nommée Uranus en l'honneur d'Uranie, la muse de l'astronomie et de la géométrie.

Les sels de ce corps, qu'on appela en définitive uranium, furent utilisés durant le XIX^e pour colorer faïences et verres de Bohême et pour renforcer les clichés photographiques. Ils permirent à Joachimsthal un léger regain d'activité. En 1880, la production mondiale d'uranium était de l'ordre de 5 tonnes, ce qui, compte tenu de sa densité représente environ un fût de 250 litres.

En 1896, Henri Becquerel découvre la radioactivité des sels d'uranium et en 1898, Pierre et Marie Curie découvrent dans la pechblende de Joachimsthal le polonium et surtout le radium qui a la plus forte activité radioactive connue alors. La nécessité d'étudier le radium d'un point de vue scientifique et médical et la très faible concentration de ce corps dans la pechblende (1 gramme de sel pour 3 tonnes de minerai) justifient en 1910 l'exploitation de filons uranifères aux États-Unis dans l'Utah et dans le Colorado et qui étaient connus depuis 1881. C'est pour la même raison qu'on ouvrira également des mines au Congo Belge dans le Katanga (1913) et au Canada près du Grand Lac de l'Ours (1931).

³ On avait fermé certaines mines d'argent, estimant qu'elles contenaient trop de « poisons non évacuables », et Agricola (1556), un médecin de la région, rapporte dans son *De re metallica*, que certaines femmes avaient épousé jusqu'à sept maris mineurs, tous morts de consommation.

⁴ Joachimsthal qui compta jusqu'à vingt mille habitants quand la capitale de la Bohême, Prague, en comptait environ cinquante mille, et Paris, cent mille, n'en avait plus qu'un peu plus de 5000 en 1900.

En 1939, la découverte de la fission de l'uranium relance l'intérêt pour ce métal, et donc son minerai, et en fait un produit stratégique. La fin de la Seconde Guerre Mondiale voit le début d'une course à l'uranium effrénée puisque la possession de ce produit permettait d'assurer une indépendance énergétique, voire militaire. Il fallu une dizaine d'années pour s'apercevoir qu'on en trouvait partout, à des concentrations diverses, bien sûr, mais très souvent rentables, ce qui n'est pas pour nous étonner vue la courbe des abondances (figure 4). À titre indicatif, on admet que le sous-sol de la France sur un mètre de profondeur contient environ un million de tonnes d'uranium et que le Rhône charrie par an près de 100 tonnes d'uranium d'origine naturelle (Société française de radioprotection). La courbe de la figure 5 donne une idée de la production d'uranium dans le monde sans commune mesure avec les cinq malheureuses tonnes du siècle précédent.

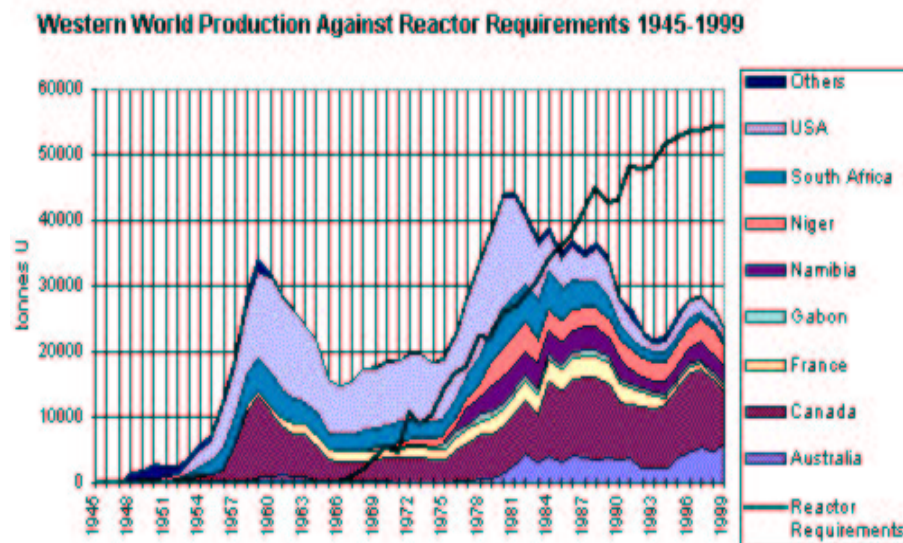


Figure 5. Courbe de production d'uranium et besoin des réacteurs d'après Uranium Information Centre Ltd .

Nous concluons ce paragraphe historique en faisant remarquer le curieux destin de la pechblende. D'abord considéré comme un déchet encombrant, il donna naissance à un corps, l'uranium, qui pendant près d'un siècle ne servit qu'à colorer des faïences ou des plaques photographiques, et en quantités bien insuffisantes pour épuiser les déchets. L'avènement du radium et de ses propriétés spectaculaires fit presque tomber dans l'oubli l'uranium pendant cinquante ans jusqu'à ce qu'on découvre ses propriétés de fission et le formidable potentiel qu'il recelait. Est-ce un clin d'œil de la Nature juste avant que les sociétés industrialisées ne soient confrontées au problème de leurs déchets ? Est-ce que nos déchets ne sont que des rebuts encombrants et inutilisables ? C'est une question qui mérite réflexion.

LES MINERAIS DE L'URANIUM (ET DU THORIUM)

Il est en effet intéressant de lier ces deux corps dont bien des propriétés sont comparables, dont le potentiel énergétique est semblable et de se demander sous quelles formes on les trouve dans la nature.

Les minerais d'uranium ou de thorium apparaissent dans un grand nombre de composés. Marcel Roubault (1958) en compte 160 dont la plupart sont utilisables jusqu'à des concentrations de l'ordre de 1/1000 si seuls l'uranium ou le thorium sont extraits. Il est même possible de descendre bien au dessous d'une telle concentration si d'autres produits sont intéressants dans le minerai ou si on accepte un coût d'extraction et de traitement plus élevé⁵. Ces minerais sont répartis en trois groupes :

- ceux où l'uranium et le thorium sont des constituants majeurs (107) ;
- ceux où l'uranium et le thorium sont des constituants mineurs (41) ;
- ceux qui contiennent de l'uranium ou du thorium à l'état d'impuretés (12).

Cette variété est tout à fait remarquable : le cuivre, qui est considéré comme un métal ayant de nombreux minerais, en a environ 20. L'étain n'en a qu'un seul, SnO₂.

Les variétés chimiques de ces minerais sont également nombreuses. On trouve :

- des oxydes anhydres ;
- des oxydes hydratés ;
- des silicates ;
- des phosphates ;
- des oxydes complexes associés aux terres rares ;
- et des carbonates, silicates, arséniate, vanadates, ...

Mais ce qui est le plus intéressant pour notre propos, c'est que l'uranium peut avoir plusieurs valences, et principalement les valences 4 et 6. Or les sels où l'uranium apparaît avec la valence 4 (et qui sont souvent de couleur verte) sont insolubles et ils peuvent donner par oxydation des sels où l'uranium a la valence 6 (qui sont souvent de couleur jaune) et qui, eux, sont très solubles.

Ce changement de valence qui, via la circulation de l'eau, se fait par oxydation dans une zone située entre le niveau hydrostatique et la surface du sol, a pour conséquence la mobilité de l'uranium dans le sol.

Citons comme exemples :

- l'UO₂, brun noir, de valence 4 devient soluble sous l'action de sels de cérium ou de thorium ;
- l'UO₃ est amphotère. Sous l'action d'acides, il donne des sels d'uranyle très solubles. Par contre, par oxydation basique, il donne des uranates insolubles, mais qui, sous l'action du CO₂ donnent des sels solubles.

Le thorium, par contre, n'intervient dans ses composés, tous insolubles, qu'avec la valence 4. Il est donc insensible aux agents météoriques et il ne pourra se concentrer que par des procédés mécaniques dans des placers. C'est comme cela qu'on le retrouve, par exemple, dans les sables de Camargue, aux environs des Saintes Maries de la Mer, dans ceux de Guaripari au Brésil, de Kérala en Inde ou des côtes de Madagascar

⁶ (Paucard, 1994).

⁵ Si l'on acceptait d'exploiter l'uranium à la même concentration que celle de l'or dans les mines d'Afrique du sud (6 grammes par tonne), on pourrait l'exploiter n'importe où sur la Terre.

⁶ où l'on exploitait le béryl (émeraude) et où la thorianite (oxyde double d'uranium et de thorium) était utilisée comme "plombs" de pêche. On a trouvé de la monazite contenant 6 % de thorium sur certaines plages de sable noir.

Du fait d'une dispersion essentiellement due à l'eau, Les gisements uranifères présenteront donc une extrême diversité par rapport aux gisements de thorium.

DES PROPRIÉTÉS RADIANTES DE L'URANIUM.

Puisque l'uranium, comme le thorium, se désintègre en une suite de corps radioactifs, il n'est pas inutile pour fixer le vocabulaire de faire un bref rappel des principales propriétés de ces derniers.

On dit qu'un corps est radioactif lorsqu'il se désintègre au cours du temps en un autre corps tout en émettant un rayonnement. On a pu montrer que cette désintégration obéissait statistiquement à une loi de type exponentiel définie par ce qu'on appelle sa « période » que les anglo-saxons appellent « demi-vie » (*half life*), c'est-à-dire le temps pendant lequel toute quantité de ce corps perd la moitié de ses éléments.

Par exemple, l'uranium a une période de 4,7 milliards d'années (Ga), ce qui veut dire que si un individu absorbe et fixe un corps contenant 1000 atomes d'uranium, il faudra qu'il attende, ou que ses restes attendent, 2,35 milliards d'années pour qu'il ne contienne plus que 500 atomes d'uranium. Il aura donc peu de chance de voir disparaître ces atomes durant son existence et les seuls effets dont il devra tenir compte de l'uranium sont les effets chimiques (métaux lourds). *A contrario*, il faudra examiner avec d'autant plus de soin les effets possibles d'un corps que sa période est plus courte parce qu'il sera d'autant plus susceptible de se désintégrer totalement dans un organisme durant la vie propre de ce dernier.

Le nombre de désintégrations par secondes d'un corps s'exprime en becquerels (Bq).

Il y a essentiellement deux sortes de rayonnement :

- le rayonnement α qui n'a que quelques centimètres de portée dans l'air et ne peut donc présenter de dangers éventuels que par ingestion ou inhalation ; il est de plus difficile à détecter sur le terrain.
- le rayonnement β qui peut avoir une portée de plusieurs mètres dans l'air et est donc beaucoup plus facilement détectable. Bien que plus pénétrant que le rayonnement α , il est potentiellement nettement moins dangereux que ce dernier.

Ces rayonnements peuvent être accompagnés d'un rayonnement γ dont l'origine est la suivante : lorsqu'un corps se désintègre, le corps produit par cette désintégration n'a aucune raison d'être dans son état d'équilibre le plus stable ; après un temps plus ou moins bref, il se place dans cet état tout en émettant un plus ou moins grand nombre de photons. Ces photons correspondent à ce qu'on appelle le rayonnement γ . Ils ont une énergie variant de quelques électron-volts à 0,1 MeV. ⁷

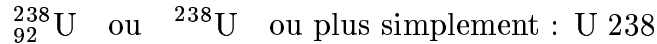
⁷ Un électron volt (eV) est l'énergie qu'acquiert un électron sous une différence de potentiel de 1 volt.

1 eV équivaut à $1.6 \cdot 10^{-19}$ joules.

Une calorie permettant de chauffer un gramme d'eau de 15° à 16°, il faudrait pour ce faire $6,25 \cdot 10^{18}$ eV, soit $6,25 \cdot 10^{18} / 0,1 \cdot 10^6 = 6,25 \cdot 10^{13}$, soit 6250 milliards de photons d'énergie maximale (0,1 MeV) donnant toute leur énergie à ce malheureux gramme d'eau dans un temps suffisamment bref pour qu'il n'ait pas le temps de se refroidir. C'est un sujet de « manip », totalement inutile, mais qui pourrait être primée car elle est, au sens des probabilités, impossible à réaliser avec la radioactivité naturelle ; pas avec des allumettes, bien sûr, où il n'en suffit que de quelques unes.

Ce rayonnement, par contre est assez facile à détecter sur le terrain.

La radioactivité est un phénomène associé aux noyaux des atomes. Ces derniers sont définis par leur nombre de protons (c'est le numéro atomique Z) et leur nombre de neutrons. On peut donc caractériser un noyau par ces nombres. Par exemple, on écrira



pour caractériser l'isotope contenant 238 nucléons dont 92 protons de l'uranium. On omet souvent le numéro atomique (92) car, d'après le tableau de Mendéléev, il y a une correspondance biunivoque entre ce nombre et le symbole (U) qui est plus parlant.

S'il est (relativement) facile de calculer l'énergie délivrée par un rayonnement donné par unité de volume⁸, il est beaucoup plus délicat d'évaluer les effets sur un organisme du même rayonnement. Ces derniers, en effet doivent tenir compte pour un individu par exemple

- du noyau émetteur ;
- de sa localisation par rapport à l'individu si le rayonnement est externe ;
- s'il a été inhalé ou absorbé si le rayonnement est interne ;
- s'il s'est ou non fixé sur un organe et lequel ;
- ...

C'est donc un problème extrêmement compliqué sur lequel se sont penchés depuis une centaine d'années nombre de biologistes, hygiénistes, médecins, physiciens, physiologistes, etc. et dont les travaux ont été résumés dans des tables continuellement mises à jour et que publie par exemple l'United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations, plus commodément appelé UNSCEAR.

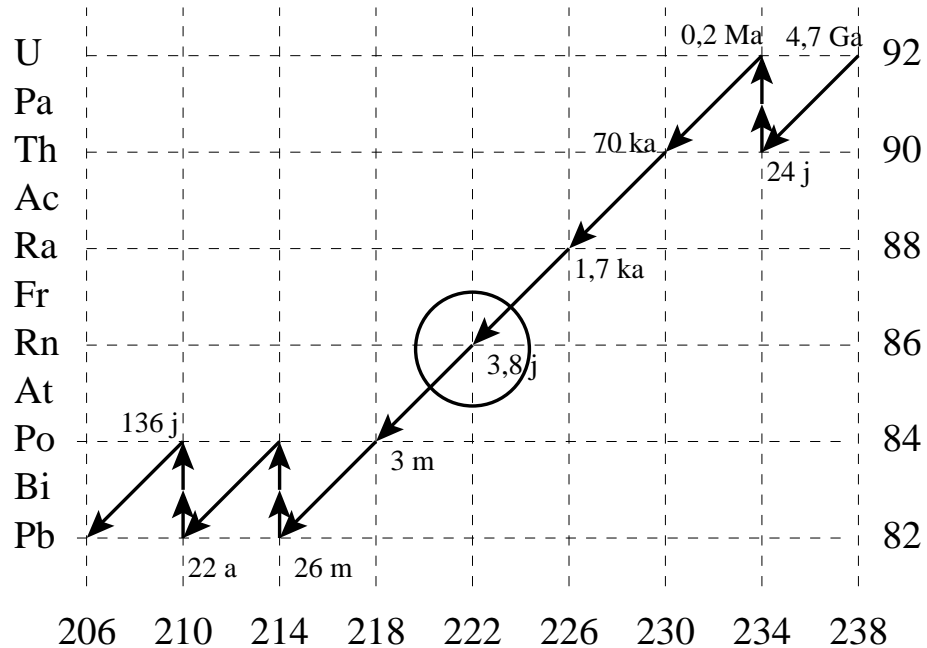
La dangerosité d'un rayonnement (sa dose ou son facteur de dose ou son équivalent de dose), de quelque origine qu'il provienne, est alors exprimée en sievert (Sv) ou plus fréquemment en millisievert (mSv). À titre indicatif, la dose annuelle due à la radioactivité naturelle moyenne dans le monde est évaluée, tous rayonnements naturels cumulés, est évaluée à 2,4 mSv/an, mais il y a bien des endroits où elle est multipliée par un facteur 10, voire plus, sans que les populations ne s'en ressentent. Toujours à titre indicatif, pour recevoir un équivalent de dose de 1 mSv, ce qui est parfaitement supportable, il faut s'arranger pour ingérer environ (Pradel et al., 2002)

- 800 Bq de polonium 210 ;
- 4000 Bq de plutonium 239 ;
- 4500 Bq de thorium 232 ;
- 22 000 Bq d'uranium 238 ;
- 76 900 Bq de césium 137 ;
- 55 000 000 Bq de tritium ;

Ces exemples ne sont là que pour donner des ordres de grandeur et bien montrer que chaque élément est « perçu » différemment par l'organisme.

⁸ On la mesure en gray (Gy) qui sont des joules par kilogramme

Figure 6. La famille de l'uranium. En abscisse sont portés les nombres de nucléons des noyaux (protons + neutrons) ; en ordonnée, les symboles des atomes (colonne de gauche) ou, ce qui revient au même, les nombres de protons (colonne de droite). Chaque nœud du réseau définit donc parfaitement un élément dont la période est en général indiquée près du nœud. Chaque pointe de flèche désigne un élément de la famille. Si la flèche est orienté en bas et à gauche de l'élément père, l'élément à été obtenu à partir d'une désintégration α ; si elle est dirigée au dessus de l'élément père, l'élément à été obtenu à partir d'une désintégration β . L'élément encerclé est le radon dont nous aurons à parler par la suite.



Revenons maintenant à des propriétés physiques des corps radioactifs. Il arrive qu'un corps radioactif se désintègre en un autre corps radioactif qui lui-même en fera autant. Ce processus se poursuivra jusqu'à ce qu'une désintégration produise un élément non radioactif. L'ensemble de ces processus s'appelle famille radioactive et est dénommée par son élément de tête. On dénombre essentiellement trois familles : celle de l'uranium, celle de l'actinium et celle du thorium. Une quatrième, théoriquement possible, a dû exister, mais compte tenu de ses propriétés, elle a dû rapidement s'éteindre (Kahan, 1954). La famille de l'uranium est représentée sur la figure 6.

Si la période d'un élément radioactif « fils » est nettement plus petite que celle de l'élément « père », il s'ensuit une propriété extrêmement importante : *au bout d'un certain temps, il y aura pratiquement autant d'éléments « fils » créés que d'éléments « fils » qui se désintègrent*. Cette propriété est connue sous le nom d'« équilibre radioactif ».

Dans son minerai, par exemple dans la pechblende, la famille de l'uranium existe en totalité et est en équilibre radioactif.

LA PROSPECTION DE L'URANIUM OU DU THORIUM

Nous sommes maintenant en mesure de parler de la prospection des éléments radioactifs qui est importante car elle place la radioactivité naturelle dans son véritable cadre qui est celui de la nature. Elle obéit (Roubault, 1958) aux mêmes principes de prospection qui sont applicables à tous les minerais, c'est-à-dire qu'elle utilise

- des données extrinsèques, à savoir des associations minéralogiques ou géologiques dans lesquelles le minéral a le plus de chances de se trouver ;
- des propriétés intrinsèques des minerais, comme leurs caractéristiques cristallo-graphiques, leurs propriétés chimiques ou physiques ; dans notre cas, il est évident que la radioactivité jouera un rôle privilégié.

En effet, le cycle géologique d'un élément quelconque montre l'existence de remises en mouvement de cet élément. Ces dernières, qui sont souvent très importantes dans le voisinage des grandes concentrations, se font grâce à un agent de transport commun, l'eau, encore et toujours elle, sous diverses formes :

- eaux de circulation superficielle ;
- eaux des nappes souterraines ;
- eaux ascendantes dans les pays arides ou dans les pays tempérés dans les périodes de sécheresse.

L'élément est alors dispersé au voisinage des grosses concentrations, ce qui peut donner lieu à des anomalies locales que l'on cherchera à repérer pour remonter jusqu'à leur source. On procédera alors par maillage en quadrillant le terrain.



Figure 7. l'*Astragalus pattersonni*. Lorsqu'on regarde les étendues que cette plante peut couvrir, on conçoit fort bien qu'un quadrillage de la zone est nécessaire.

La prospection de l'uranium obéit évidemment à ces règles. On peut les compléter en appliquant des

- méthodes de type géophysique : la résistivité moyenne des zones à gîte est inférieure aux autres zones du fait de fractures du terrain ;
- méthodes de type botaniques : certaines plantes fixent sélectivement dans leurs racines, leurs tiges ou leurs feuilles les éléments contenus dans le sol sur lequel elles vivent. On s'est par exemple aperçu au États-Unis, dans le Colorado qu'une plante fourragère, l'*Astragalus pattersonni* (figure 7) fixait le sélénium des minerais d'uranium ; qu'il en était de même, quoiqu'à un degré moindre, pour la Ray-grass indien (*Oryzopsis hyménoïde*) qui compose souvent nos pelouses. Mais ce ne sont pas les seuls, les crucifères (giroflées, choux, moutarde, cresson, radis, . . .) en font autant.

La méthode ci-dessus peut se généraliser aisément : une prospection a été faite, par exemple, dans les Vosges à partir d'une pépinière de sapins en analysant dans une maille régulière le même organe d'une même espèce au même stade végétatif.

La détermination du minéral d'uranium se fait à partir de ses propriétés intrinsèques :

- la radioactivité est utilisée, bien sûr. Mais comme nous le verrons, le radon qui est un descendant de l'uranium est un gaz soluble. Il peut donc être entraîné très loin du minerai. Un gîte peut ne pas contenir de minerai (gîte stérile) alors que les produits de fission du radon fournissent un rayonnement intense.
- la réponse aux ultra-violets : certains minéraux, comme l'autunite, répondent par une fluorescence intense, souvent de couleur jaune-vert. Mais ce n'est pas vrai pour tous : c'est faux pour la pechblende et pour l'uraninite à température ordinaire. Cette technique n'est pratiquement utilisable que sur des fonds de batées ou dans l'obscurité des galeries de mine.
- les dosages chimiques qui utilisent des méthodes fluorimétriques, calorimétriques ou chromatographiques.

Comme on le voit, la recherche et la détermination des minerais d'uranium, même si l'on en trouve partout, est une opération délicate qui procède par approches successives.

5. Détermination d'un indicateur naturel radioactif.

Puisque la radioactivité est un phénomène naturel, il est logique d'essayer de déterminer parmi ses conséquences auxquelles nous sommes exposés celles qui peuvent fournir un ordre de grandeur de cette exposition et qui pourront servir ultérieurement d'échelle pour la comparaison des conséquences de la radioactivité induite par l'homme.

L'un deux, le polonium 210, paraît être un excellent candidat pour ce propos, et nous allons expliquer pourquoi.

Revenons aux éléments de la famille de l'uranium décrite décrits sur la figure 6.

Tout d'abord l'uranium. Sa concentration dans la croûte terrestre correspond en moyenne à 3 grammes par tonne, ce qui équivaut environ à 40 000 Bq d'uranium 238 par tonne (c'est-à-dire que 40 000 désintégrations par seconde dans chaque tonne de terre sont uniquement dues à l'uranium 238).⁹

Dans la masse de la croûte terrestre, l'uranium est en équilibre radioactif avec ses descendants, ce qui veut dire que chacun d'eux émettra 40 000 Bq par tonne, ou, ce qui revient au même, à chaque instant, il y a création de 40 000 atomes de chacun des descendants. On peut dire également que leur concentration est pour chacun de 40 000 Bq par tonne.

Sautons quelques éléments pour arriver au radon 222. C'est un gaz rare, très soluble dans l'eau ; il est radioactif de période 3,8 jours. Lorsqu'il est créé, seuls trois cas sont possibles :

- ou le radon reste confiné dans le minerai ; c'est ce qui se produit dans la masse de la pechblende, par exemple, et l'équilibre radioactif se poursuit jusqu'à la fin des temps (de l'uranium) ;
- ou, passant par des fissures, il est drainé par l'air ou par l'eau et se retrouve dans des poches souterraines ; on dit dans ce cas qu'il s'agit de radon « émané ».
- s'il parvient à sortir jusqu'à l'atmosphère libre ; on dit dans ce cas qu'il s'agit de radon « exhalé ».

⁹ C'est une moyenne ; elle n'est jamais inférieure à 4000 Bq, mais il existe des zones uranifères de dimensions kilométriques où la concentration est de 5 à 10 fois cette moyenne.

On admet actuellement (NCRP, 1984) que le flux mesuré de radon 222 exhalé au niveau du sol est d'environ 10 000 atomes par m² et par seconde,¹⁰ ce qui légitime un modèle où l'on fait l'hypothèse que tous les atomes de radon sur une profondeur de 20 cm à 1 m sont systématiquement exhalés.

Le radon exhalé commence alors une promenade dans l'atmosphère où il ne tarde pas (figure 6) à se désintégrer pour donner naissance à la suite de sa descendance dont la principale particularité est de se fixer sur les particules qui composent les aérosols. Au bout de quelque mois, ces derniers retombent sur terre et un simple coup d'œil au schéma de la figure 6 montre qu'alors c'est le plomb 210 de période 22,3 ans qui sera majoritaire.

Ce plomb 210 est peu mobile, à peu près insensible au lessivage des eaux. Si les sols ne sont pas remaniés, il reste en surface et en quelques dizaines d'années, il se produira un équilibre entre le plomb 210 qui retombe et celui qui se désintègre en polonium 210.

On peut admettre que les sols ne récupèrent que 50% du flux d'exhalaison du radon 222, le reste retombant par exemple dans la mer ou dans des sols remaniés. Avec cette hypothèse, le flux de retombée du radon d'exhalaison correspond à 5 000 atomes de plomb 210 par seconde et par m².

En admettant les hypothèses du modèle ci-dessus (Pradel *et al*, 2001), l'activité volumique du plomb 210 sur les 5 premiers centimètres vaut l'activité volumique du plomb 210 issu des retombées augmenté de l'activité volumique du plomb 210 provenant du radon émané (figure 8). Soit :

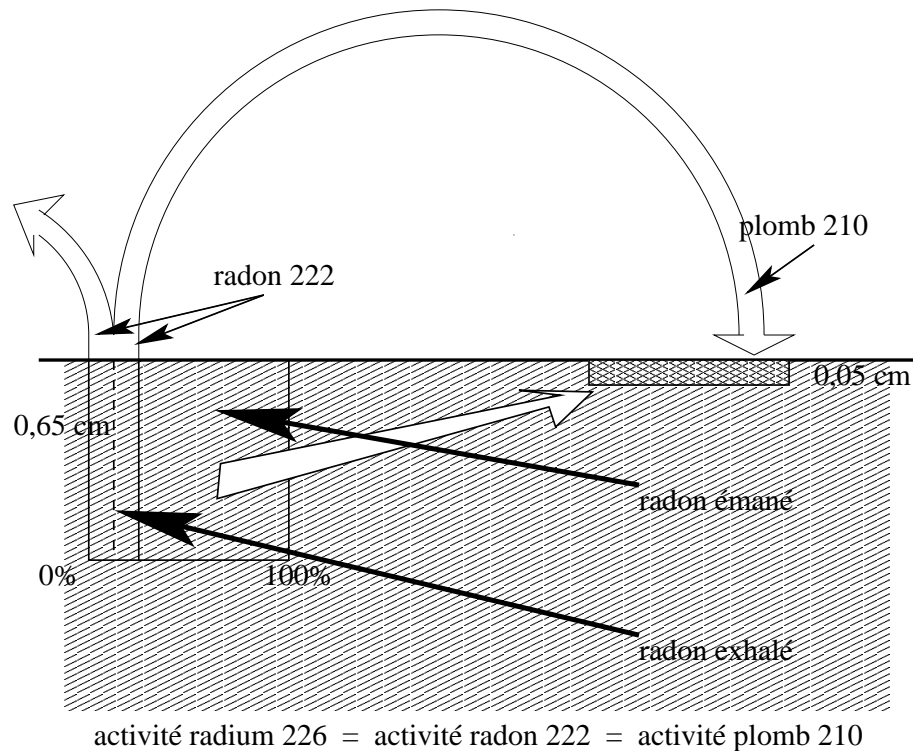
$$\begin{aligned} & \left(0,5 * 0,25 * \frac{65}{5} + 0,75 \right) * \text{activité du radium 226} \\ & = (1,625 + 0,75) * \text{activité du radium 226} \\ & = 2,4 * \text{activité du radium 226} \end{aligned}$$

où

- 0,5 correspond aux retombées (la moitié du radon exhalé) ;
- 0,25 correspond au quart du radon produit qui est exhalé ;
- 65/5 fournit la contribution par unité de volume ;
- 0,75 correspond au radon émané (les 3/4 du radon produit).

¹⁰ En réalité, le rapport indique plus précisément 8 800.

Figure 8. Mécanisme de concentration en plomb 210. Chaque phase de cet ensemble est en équilibre radioactif. Sur la partie gauche est symbolisée la proportion de radon exhalé par unité de surface. Sur la partie droite, c'est la proportion de plomb 210 par unité de surface qui est symbolisée. Dans ce modèle, à 65 cm au dessous de la surface, on retrouve l'équilibre radioactif de la famille de l'uranium.



Si 40000 Bq d'uranium 230 sont produits par tonne de terre, la concentration en plomb 210 sur les 5 premiers cm depuis la surface du sol sera de $2,4 * 40000$, soit environ 100000 Bq. Il y a donc un net enrichissement en plomb 210 de la surface.

Ce phénomène se produisant depuis toujours, le plomb 210 se désintégrera en polonium 210 qui, lui aussi, est peu mobile. Les deux corps seront donc en équilibre radioactif et la surface du sol sera enrichie en polonium 210.

Les résultats des mesures (Ladinskaya *et al.*, 1973 ; Thomas, 2000) semblent confirmer les prédictions de ce modèle, les écarts pouvant se justifier parce que le polonium 210 serait un peu plus mobile dans le sol que les hypothèses ne le prévoient.

En conclusion de cette partie d'étude, la théorie et l'expérience prévoient au niveau du sol une augmentation très sensible de la radioactivité naturelle dans les régions où le sol n'est pas remanié. Cette radioactivité est due au plomb 210 de période 22,3 ans et à son descendant le polonium 210 de période 138 j.

La localisation de ces éléments fait qu'ils se retrouvent naturellement dans le cycle alimentaire et en particulier le polonium dont la faible période induit depuis toujours une action sur l'homme que l'on peut doser. C'est pourquoi il nous paraît convenir tout particulièrement pour servir de repère de doses naturellement reçues.

6. Exemple d'utilisation du polonium 210 comme indice naturel de radioactivité.

Puisque nous avons montré dans la section précédente que le polonium 210 ne pouvait pas ne pas avoir d'impact sur les doses reçues par l'Homme dans son alimentation, il est normal d'évaluer cet impact et de le comparer à d'autres sources d'irradiation. Nous avons choisi de le comparer aux doses reçues du césium 137 des retombées de Tchernobyl dans une région et à une époque où elles avaient leur valeurs maximales, à savoir la région de la mer Baltique, deux jours après la catastrophe.

- Commençons par le commencement. Si le polonium 210 apparaît comme retombée du plomb 210 sur les sols, on doit de même le retrouver dans les mers. Partant des données de l'UNSCEAR (1993) et de l'AIEA (1982), Aarkrog *et al.* ont évalué la part du polonium 210 dans l'eau de mer et ses occupants. Certains de leurs résultats sont résumés dans le tableau de la figure 9.

eau de mer	0,001	Bq/kg (à $\pm 0,0005$ Bq/kg)
poissons	2,4	Bq/kg
crustacés	6,0	Bq/kg
mollusques	15,0	Bq/kg

Figure 9. Concentration moyenne de polonium dans les mers. Rappelons (Société française de radioprotection) que l'activité de l'eau de mer est en moyenne de 12 Bq par kg. Il est intéressant de constater sur ce tableau comment une faible activité peut se trouver fortement et diversement concentrée selon et par les espèces.

Aarkrog *et al.* (1997) ont calculé une dose collective mondiale due à l'ingestion de ce polonium 210 et trouvent 30 000 homme-sievert par an, année de référence 1990. Ce chiffre, même s'il a été ajusté au mieux, ne donne qu'une valeur indicative ; il correspond à une exposition moyenne naturelle individuelle de 6 microsievert par an, valeur qui est à comparer avec les 3,5 millisievert d'exposition moyenne de l'Homme par an dans nos régions (Société française de radioprotection).

Nous disposons donc d'un repère, d'un indice, dans le milieu marin. Nielsen (1998) s'en est servi pour calculer des doses collectives (en homme-sievert) sur 100 ans autour de la Baltique et dont nous avons résumé les résultats sur le tableau de la figure 10.

Comme nous l'avons déjà dit, les doses collectives n'ont qu'un intérêt indicatif ; c'est pourquoi nous avons ajouté une colonne montrant l'importance relative de ces influences par rapport à la plus faible. L'interprétation de ces chiffres est évident et laissée au lecteur.

	homme.sievert	importance relative
polonium 210	20000	100
retombées (Tchernobyl)	1400	7
retombées (essais nucléaires)	700	3,5
usines de retraitement	200	1

Figure 10. Doses collectives sur 100 ans évaluées autour de la Baltique et provenant du milieu marin.

- Poursuivons maintenant l'étude de notre indicateur, le polonium 210, en examinant les informations qu'il fournit dans le milieu terrestre.

Il est admis que dans le cas du polonium 210 ou du césium 137 (retombées de Tchernobyl), l'exposition la plus critique est celle due à la consommation de viande et de lait. Le tableau de la figure 11 montre des résultats calculés par l'UNSCEAR (1997) calculés à partir de données sur les retombées de césium 137 dans la région de Helsinki deux jours après Tchernobyl. Les chiffres sont comparés à ceux du polonium 210.

	polonium 210	césium 137
Activité viande de bœuf	0,76 Bq/kg	0,4 Bq/kg
Activité lait et dérivés	0,05 Bq/kg	1,2 Bq/kg
enfant 1-2 ans		
19 kg viande/an	155 μ Sv/an	2,9 μ Sv/an
200 kg lait/an		
adulte		
80 kg viande / an	80 μ Sv/an	2,3 μ Sv/an
120 kg lait /an		

Figure 11. Influence du polonium 210 (naturel) et du césium 137 (retombées de Tchernobyl) dans l'alimentation dans la région de Helsinki.

Comme dans l'exemple précédent, ce dernier est suffisamment clair et ne nécessite aucun commentaire si ce n'est qu'il faut rappeler que, compte tenu de sa période, le césium voit son activité diminuer de deux tous les trente ans, alors que celle du polonium 210 reste constante.

7. Conclusion.

Au cours de cet exposé, nous avons montré que la radioactivité naturelle existait partout, depuis toujours et même avant que les premières molécules d'eau n'existent.

Nous avons vu sur quelques exemples que, depuis la création de notre système solaire en général et celle de la Terre en particulier et bien avant que la vie ne fasse son apparition, eau et radioactivité naturelle coexistent et interagissent constamment.

Nous avons montré également comment un élément radioactif, le polonium 210, influait sur l'Homme et pouvait servir d'échelle de comparaison des doses reçues provenant d'autres corps radioactifs artificiels ou non. Cet indicateur n'est certainement pas le seul, mais il nous paraît particulièrement significatif et est tout à fait à même de définir un indice naturel de radioactivité tout à fait performant.

Nous croyons que s'il est tout à fait nécessaire de quantifier les influences que la radioactivité artificielle peut avoir sur la nature en général et sur l'eau en particulier, il est fondamental de constamment la comparer à la seule échelle dont nous disposons partout, celle de la radioactivité naturelle.

Nous pensons enfin que, du fait de leur constante interaction depuis toujours, il est impossible que la radioactivité ne tienne pas une place importante en hydrobiologie. Ce domaine reste cependant encore largement à développer.

Références

- Aarkrog *et al.*, 1997, *A comparison of doses from Cs 137 and Po 210 in marine food, a major international study*. J. Environ. Radioactivity, **34**, n°1, p.69-90.
- Agricola Georgius, 1556, *De re mettalica*, traduction par Albert France-Lanord, édition Gérard Klopp, Thionville, 1987.
- AIEA, 1982, *Publications Safety Series*, n°57.
- Gamow George, 1961, *La création de l'univers*, Dunod.
- Goldschmidt Bertrand, 1987, *Pionniers de l'atome*, Stock.
- Greenwood N.N. and Earnshaw A., 1984, *Chemistry of the Elements*, Pergamon.
- Hoppe Thomas Charles, 1805, *Observations on the contraction of water by heat at low temperature*.
- Kahan Théo, 1954, *Physique nucléaire*, Armand Colin, Paris.
- Ladinskaya L.A., Parfenof Y.D., Popov D.K., Fedorova A.V., 1973, *Pb 210 and Po 210 content in air, water, foodstuffs, and the human body*, Arch. Environ. Health, **27**, p.254-258.
- Launay (de), 1913, *Traité de métallogénie. Gîtes minéraux et métallifères*, Béranger, Paris.
- Nielsen S.P., 1998, *The radiological exposure of man from radioactivity in Baltic sea*, IAEA-SM-354/45, IAEA.
- NCRP Reports, 1984, n°77.
- Paucart Antoine, 1994, *La mine et les mineurs de l'uranium français*, 3 tomes, Éditions Thierry Parquet, 1994, Brive.
- Picaud S., Hoang P.N.M., Hamad-Gomez S., Mejias J.A. et Lago S. 2002, *Simulation de l'adsorption de molécules d'eau sur une surface de graphite défective*, Journées Simulation Numérique, Matière condensée et Désordre, Universités Pierre et Marie Curie et Denis Diderot, 27-28 mai 2002, Paris.
- Pradel J., Zettwoog P., Dello N., Beutier D., 2001, *Le polonium 210, un repère naturel important en radioprotection*, Radioprotection, **4**, n° 4, p.401-416.
- Pradel J., Beutier D., Dello N., 2002, *La radioactivité naturelle, source de repères*, Mines – Revue des ingénieurs, n°398, p.15-19.
- Roubault Marcel, 1958, *Géologie de l'uranium*, Masson, 462 pages.
- Société française de radioprotection, *La radioactivité dans l'environnement et Becquerel et radioactivité d'origine naturelle*, BP 72, 92265 Fontenay-aux-Roses.
- Thomas P.A., 2000, *Radionuclides in the terrestrial ecosystem near a Canadian uranium mill, Part 1, distribution and doses*, Health Phys. **78**, n°6, p.614-624.

UNSCEAR, 1993, *Sources and Effects of Ionizing Radiations*, Report of the General Assembly with Scientific Annexes.

UNSCEAR, 1997, *Conférence de Vienne*, 16 au 28 juin, Dose Assessment Methodology, Rapport 46^e session.

Uranium Information Centre Ltd, GPO Box 1649N, Melbourne 3001, Australia. Email : uic@mpx.com.au