

Connaissance actuelle des sources d'irradiation naturelle

A. RANNOU*

(Manuscrit reçu le 19 septembre 1998, révisé le 18 mai 1999, accepté le 1^{er} juillet 1998)

RÉSUMÉ Nos connaissances sur les sources naturelles de rayonnements ont beaucoup progressé au cours de ces quinze dernières années. Il est aujourd'hui possible d'établir un bilan assez précis des doses qui en résultent en moyenne pour les populations. Il s'avère aujourd'hui que les incertitudes principales entachant les estimations de dose sont dues aux incertitudes des modèles dosimétriques permettant la conversion d'exposition en dose. Le radon est sans doute le radionucléide pour lequel les incertitudes sont les plus grandes, mais il en existe aussi pour les rayonnements cosmiques et les radionucléides ingérés.

ABSTRACT Current knowledge of the natural sources of radiation.

Our knowledge of the natural sources of radiation has been considerably improved since the last fifteen years. Nowadays it is possible to assess precisely the average doses received by individuals. The major uncertainties which are associated to the dose estimates may be attributed to the uncertainties on the exposure-to-dose conversion factors given by the dosimetric models. Radon is certainly the radionuclide for which the uncertainties are the most important, but doses originating from cosmic rays and ingested radionuclides are also difficult to assess.

1. Introduction

Toute forme de vie sur terre est inévitablement soumise à l'exposition aux sources naturelles de rayonnements. Bien avant que l'homme n'en soupçonne l'existence, la radioactivité naturelle a été recherchée pour ses vertus curatives, par exemple lors de cures thermales, ou encore pour les propriétés luminescentes de certains matériaux. Progressivement, à partir du début du siècle, on a pris conscience que l'homme vit perpétuellement dans un environnement naturellement radioactif trouvant son origine dans la croûte terrestre mais aussi en provenance de l'espace. Le nombre de publications scientifiques sur les rayonnements naturels a connu une

* Institut de protection et de sûreté nucléaire, IPSN, BP n° 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France.

augmentation quasi exponentielle au cours des années. Beaucoup de nouvelles connaissances ont été acquises notamment au cours de ces quinze dernières années concernant la radioactivité naturelle, ses différentes voies et conditions d'exposition pour l'homme, sa variabilité, la relation entre exposition et dose, finalement son impact potentiel pour la santé. Il est aujourd'hui possible d'en dresser un tableau assez complet et précis.

Il existe deux sources d'irradiation naturelle pour l'individu : les rayonnements cosmiques d'une part et les éléments radioactifs présents dans la croûte terrestre d'autre part. Ces deux sources donnent lieu à une exposition interne et externe des individus. Les niveaux d'exposition varient considérablement d'un lieu à un autre et peuvent conduire à des doses également très variables selon les individus. Certaines sources de rayonnements naturels peuvent, selon les circonstances ou les activités humaines, conduire à des doses relativement élevées. C'est le cas du radon et des rayonnements cosmiques, ce qui justifie la place particulière qui leur est réservée aujourd'hui tant en ce qui concerne les recherches que les aspects réglementaires.

2. Découverte de la radioactivité naturelle

En 1895, Röntgen découvre les rayons X, ce qui lui vaudra le premier prix Nobel (1901). L'année suivante, Becquerel, spécialiste de la fluorescence, découvre la radioactivité¹ naturelle en exposant une plaque photographique à des sels d'uranium. Il présente sa découverte à l'Académie des sciences le 2 mars 1896. Ces découvertes sont à l'origine des travaux de Pierre et Marie Curie avec lesquels Becquerel partagera le prix Nobel en 1903. P. et M. Curie parviennent, en 1898, à extraire de plusieurs tonnes de minerai d'uranium, deux corps fortement radioactifs : le polonium et le radium. Le radium acquiert rapidement une grande notoriété et trouve de multiples usages. Ainsi, ses qualités phosphorescentes seront mises à profit dans l'industrie horlogère pour rendre les cadrans et chiffres lumineux, jusqu'à ce qu'un dentiste new-yorkais soit surpris de diagnostiquer un grand nombre de cancers de la mâchoire chez des jeunes ouvrières de cette industrie. Celles-ci avaient en effet pour habitude de lécher la pointe de leur pinceau pour en affiner l'extrémité. On a même trouvé du radium dans le costume d'une célèbre meneuse de revue des Folies Bergères. L'uranium a, quant à lui, été utilisé pour donner la coloration du verre, des poteries, des faïences, des carrelages, etc., ou pour donner un éclat « naturel » aux dents en céramique. Les procédés chimiques d'extraction du radium ayant été mis au point, de nombreuses applications médicales du radium et de son émanation, le radon seront trouvées, tout au moins jusqu'à ce qu'on démontre la toxicité du radium et du radon vers 1930. Les traitements les plus connus à l'époque

¹ Terme utilisé pour la première fois dans une note de Pierre Curie en 1888.

sont ceux prodigués en faisant inhaler du radon aux curistes dans les établissements thermaux (radon spas). De nombreux appareils d'inhalation (« radiumator », « aktivator ») promettant les bienfaits de la radioactivité sont vendus dans le commerce.

3. Les rayonnements cosmiques

3.1. Leur découverte

C'est en 1912 que l'autrichien Victor Hess découvre – ou plutôt confirme – l'existence des rayonnements cosmiques pressentie au tout début du siècle. Ayant embarqué une chambre d'ionisation à bord d'un ballon, il met en évidence une augmentation du courant d'ionisation au cours de l'ascension jusqu'à 5350 m d'altitude. Ces résultats viendront confirmer les observations faites par Wulf lors d'expériences antérieures sur la tour Eiffel. Hess recevra le prix Nobel pour sa découverte en 1936. Dès 1930, Picard et Cosyns atteignent une altitude de 16 km en ballon et, constatant les contraintes de la présence humaine, mettent au point des techniques de détection automatique qui permettront de réaliser des mesures beaucoup plus haut. Les premières mesures à l'aide d'une chambre d'ionisation montrent que les 'rayons cosmiques' sont constitués d'une composante « molle » dont l'intensité augmente avec l'altitude et d'une composante « dure » beaucoup plus pénétrante qui subsiste au fond des lacs et même dans les mines très profondes. L'expérience de Rossi en 1933 à l'aide d'un groupe de compteurs G.M. montés en coïncidence permettra de mettre en évidence les grandes gerbes cosmiques et de préciser ainsi la distinction plus subtile de « rayonnement primaire » (venant de l'espace) et de « rayonnement secondaire » (produit dans l'atmosphère). Une particule extrêmement pénétrante de masse intermédiaire entre l'électron et le proton est découverte : le muon. Cette particule est responsable du phénomène de cascade électromagnétique étudiée au Pic du Midi de Bigorre par P. Auger en 1938. Il montre alors que les gerbes – auxquelles leur sera donné son nom – ont un rayon qui peut atteindre 300 m.

L'étude des rayonnements cosmiques a permis de faire des progrès considérables dans le domaine de la physique des particules de haute énergie, ceci bien avant la construction des grands accélérateurs. Elle a aussi permis d'expliquer les magnifiques phénomènes de la nature que sont les aurores boréales, produites par la précipitation d'électrons et d'ions du vent solaire dans les couches ionisées de la haute atmosphère (la couleur est due à la désexcitation des espèces moléculaires impactées par les particules du vent solaire). Enfin, les manifestations des rayonnements cosmiques sur notre planète trouveront rapidement leur intérêt pour la datation par la méthode du ^{14}C , mais aussi pour des applications moins connues en géologie ou en archéologie. Le Pr. Alvarez a ainsi mis au point une méthode de recherche des cryptes dans les pyramides, basée sur l'atténuation de l'épaisseur d'absorbant traversée par les muons cosmiques. De même, l'absorption des rayons cosmiques dont

le flux est constant au niveau de la mer par quelques mètres d'eau a été mise à profit par Alkoffer et Simon pour estimer l'amplitude des marées (Capdevielle, 1984).

3.2. Leur origine

L'origine des rayonnements cosmiques n'est pas encore complètement connue à ce jour. Il semble toutefois qu'il y ait à la fois une origine galactique (étoiles à forte activité, explosion de supernovae, rayonnement des pulsars) et une origine extragalactique.

3.2.1. Le rayonnement cosmique primaire

Le système solaire est continuellement bombardé par des particules chargées de haute énergie sans doute produites lors d'éruptions stellaires dans toute notre galaxie : protons (85 %), particules alpha (12 %), électrons (2 %) et ions lourds (1 %). Leur trajectoire est déviée par le champ magnétique solaire et celui de la terre ainsi que par le vent solaire. Ces particules constitue une composante stable et essentielle du rayonnement cosmique dit primaire. L'autre composante, en provenance du soleil, est générée par les perturbations magnétiques qui existent à la surface du soleil (éruptions solaires). C'est le « vent solaire » constitué de protons pour la plupart, dont l'intensité varie avec l'activité solaire (cycle de onze ans).

3.2.2. Le rayonnement cosmique secondaire

En pénétrant dans l'atmosphère, les particules primaires incidentes interagissent avec les constituants de l'air en donnant un ensemble complexe de particules secondaires (protons, neutrons, ...) et de photons. Ces particules à leur tour interagissent pour donner des phénomènes de cascade nucléonique dans l'atmosphère. Compte tenu de leur absence de charge et de leur plus long libre parcours moyen, les neutrons deviennent prédominants à mesure que progresse la cascade.

3.3. Exposition externe aux rayonnements cosmiques

3.3.1. Au niveau du sol

Le rayonnement cosmique est composé principalement de muons d'énergies comprises entre 1 et 20 GeV. Ces particules contribuent pour environ 80 % à la dose absorbée dans l'air, le reste étant dû aux électrons. L'UNSCEAR (1993) admet une valeur moyenne de 32 nGy/h pour cette composante directement ionisante. L'effet de la latitude est d'environ 10 %, de sorte que le débit de dose à une latitude inférieure à 30° est d'environ 30 nGy/h au niveau de la mer. L'intensité du rayonne-

ment cosmique au niveau du sol varie très faiblement au cours du temps en relation avec différents phénomènes : effets atmosphériques liés aux variations de l'épaisseur d'absorbant atmosphérique en fonction de la pression et de la température, variation diurne due à la rotation du champ magnétique avec le soleil (amplitude de 0,3 % pour les nucléons et 0,1 % pour les muons), effets des éruptions solaires (baisse de 20 % de l'intensité des neutrons au lendemain des éruptions solaires), enfin variations à vingt-sept jours, onze ans et longues périodes liées à la rotation du soleil et à l'activité solaire (Capdevielle, 1984).

Le facteur de qualité pour les rayonnements cosmiques peut être admis égal à 1. À l'intérieur des bâtiments, les rayonnements sont atténués par les matériaux de construction (facteur moyen de 0,8). La dose efficace annuelle liée à la composante directement ionisante est estimée à 240 μSv au niveau de la mer, celle liée à la composante neutronique à 30 μSv (UNSCEAR, 1993).

Au total, la dose efficace annuelle due aux rayonnements cosmiques varie selon l'altitude et la latitude ainsi que la répartition du temps entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. La dose moyenne pondérée par la population à l'échelle du globe est évaluée à environ 380 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ par l'UNSCEAR. Les populations vivant en altitude reçoivent des doses plus élevées. Par exemple, la dose moyenne reçue en une année par les habitants de Mexico (2240 m) est estimée à 820 μSv , celle des habitants de La Paz en Bolivie (3900 m) à 2 mSv.

3.3.2. Aux altitudes des avions long courrier

Le débit de dose augmente avec l'altitude, la latitude et en fonction de l'activité solaire : à l'équateur, les valeurs s'échelonnent entre 1 et 3 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ environ, entre 8 et 12 km d'altitude. Pour des latitudes supérieures à 50°, le débit de dose correspondant est de l'ordre de 3 à 10 $\mu\text{Sv}/\text{h}$. Les contributions relatives des composantes de faible TLE² et fort TLE sont comparables aux altitudes régulières de vol. Le facteur de qualité moyen est proche de 2 (McAulay *et al.*, 1996). Le débit d'exposition est relativement constant quel que soit l'endroit dans l'avion. Des niveaux d'exposition plus élevés peuvent être rencontrés à bord d'avions supersoniques : aux altitudes de croisière du Concorde (supérieures à 15 000 m), le débit de dose atteint 10 à 12 $\mu\text{Sv}/\text{h}$. Pour les pilotes, des doses annuelles allant de 3 à 6 mSv peuvent être estimées (Bottollier-Depois, 1997).

3.3.3. À bord des stations orbitales

Les spationautes constituent une « population » particulièrement exposée aux rayonnements cosmiques. Les débits de dose journaliers à bord des stations orbitales de type MIR sont de l'ordre de 0,8 mSv (Bottollier-Depois *et al.*, 1996). Des valeurs

² Transfert linéique d'énergie.

plus importantes peuvent être atteintes lors de passage dans l'anomalie atlantique sud (dépression dans les ceintures de radiation de Van Allen) et lors d'éruptions solaires. Les ions lourds représentent probablement le risque le plus critique pour les spationautes : lors de la mission Apollo 11 dans la lune, les spationautes voyaient des éclairs les yeux fermés. Il s'agissait de l'impact des ions lourds sur les cellules de la rétine.

3.4. Radionucléides cosmogéniques

L'interaction des particules de rayonnement cosmique avec les atomes de l'atmosphère conduit à la production de radionucléides tels que ^3H , ^7Be , ^{14}C et ^{22}Na . C'est l'incorporation (inhalation et ingestion *via* la chaîne alimentaire) de ces différents radionucléides qui est responsable de l'exposition interne de l'individu. L'essentiel de l'exposition des populations provient du ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ ans) issu de l'interaction des neutrons cosmiques avec le ^{14}N . Transformé en $^{14}\text{CO}_2$, il participe au cycle de la photosynthèse. La principale source de tritium d'origine naturelle ($T_{1/2} = 12,3$ ans) est due à l'interaction des rayonnements cosmiques avec les noyaux d'azote (N_2) et d'oxygène (O_2). Le tritium est présent dans la biosphère le plus souvent sous forme d'eau tritiée. En incorporant cette eau, l'homme reçoit une dose efficace annuelle de l'ordre de $0,01 \mu\text{Sv}$. Le ^7Be ($T_{1/2} = 53,3$ jours) résulte des phénomènes de spallation des noyaux de C, N, O lorsqu'ils absorbent les protons et neutrons du rayonnement primaire. Une fois formé dans la troposphère, le ^7Be (ion inorganique) se fixe rapidement sur les aérosols ambiants avec lesquels il finit par se déposer au niveau du sol, notamment sur les surfaces foliaires. La dose annuelle, *via* la consommation de légumes frais, est évaluée à $0,03 \mu\text{Sv}$. Enfin le ^{22}Na ($T_{1/2} = 2,6$ ans) apporte de la même façon une dose annuelle de l'ordre de $0,15 \mu\text{Sv}$.

4. Les rayonnements terrestres

Les radionucléides naturels d'origine terrestre sont présents à des teneurs diverses dans tous les milieux de notre environnement, y compris l'organisme humain. Seuls les radionucléides dits primordiaux, de période comparable à l'âge de la terre (~ 4,5 milliards d'années), ainsi que leurs descendants, existent aujourd'hui en quantité significative. On estime que la radioactivité totale de la terre produit la moitié des quelques 42×10^{12} W d'énergie d'origine interne de notre planète. Celle-ci est responsable d'un flux géothermique de 100 mW m^{-2} à la surface de la terre (à comparer au flux solaire incident sur la terre de l'ordre de 100 W m^{-2}).

4.1. Exposition externe

L'exposition externe des individus résulte essentiellement des émissions gamma produites par les radionucléides des chaînes de ^{238}U et de ^{232}Th ainsi que du ^{40}K ,

tous trois présents dans les sols et les matériaux de l'environnement. Le débit de dose absorbée dans l'air dépend en premier lieu de la teneur des sols et matériaux en ces différents radioéléments. Il peut varier par ailleurs en relation avec l'enneigement (qui joue un rôle d'écran), l'humidité du sol (en modifiant sa densité) ou la concentration des descendants du radon dans l'atmosphère qui contribuent au débit de dose. La famille radioactive de l' ^{238}U , celle du ^{232}Th et le ^{40}K contribuent chacun pour un tiers environ à l'exposition externe totale subie sur un sol standard (typiquement entre 10 et 200 nGy h⁻¹). Les teneurs en radionucléides naturels dans les sols sont toutefois extrêmement variables (Tab. I) et peuvent conduire dans certains lieux à des débits de dose absorbée dans l'air extrêmement élevés : 100 à 4 000 nGy h⁻¹ sur les plages de monazite (riches en thorium) d'Espírito Santo au Brésil, 700 à 30 000 nGy h⁻¹ en Iran dans des régions d'alluvions riches en uranium et thorium. En France, des mesures intégrées à l'aide de dosimètres thermoluminescents ont été effectuées dans une soixantaine de départements, totalisant plus de 6 000 points de mesure (Rannou, 1985). Les valeurs de débit de dose à l'air libre s'échelonnent entre quelques nGy h⁻¹ et 295 nGy h⁻¹. Les valeurs moyennes les plus élevées sont obtenues dans les départements au sous-sol granitique du Massif Central : environ 120 nGy h⁻¹ dans les départements du Limousin. Les moyennes les plus faibles sont obtenues dans les départements au sous-sol de type sédimentaire (20 nGy.h⁻¹ environ dans les Bouches-du-Rhône). Des valeurs beaucoup plus élevées peuvent être observées localement. Delpoux (1974) rapporta un point exceptionnel dans les Pyrénées où le débit de dose atteignait (avant exploitation du minerai d'uranium) 1×10^{-4} Gy h⁻¹.

TABLEAU I
Concentrations moyennes en radionucléides primordiaux dans les sols.
Average concentrations of primordial radionuclides in soils.

radionucléide	^{40}K	^{238}U	^{232}Th
valeurs typiques (Bq kg ⁻¹)	12-1570	2-230	2-190
moyenne (Bq kg ⁻¹)	400	32	28

Le débit de dose absorbée dans l'air à l'intérieur des habitations est généralement plus élevé qu'à l'extérieur (~ de 20 % en moyenne, mais parfois beaucoup plus) en raison de la contribution des matériaux de construction.

L'exposition qui résulte des rayonnements terrestres peut être estimée en prenant une valeur de 0,7 Sv Gy⁻¹ (UNSCEAR, 1993) pour convertir la dose absorbée dans l'air en dose efficace. En admettant un taux de présence de 80 % et 20 % respectivement à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments, la dose efficace annuelle moyenne due à l'exposition externe aux rayonnements gamma d'origine tellurique est de 0,46 mSv pour la population mondiale (UNSCEAR, 1993).

4.2. Exposition interne (hors radon)

4.2.1. Inhalation

Une première composante de l'exposition par inhalation résulte d'une remise en suspension dans l'atmosphère de particules originaires du sol, sous l'effet du vent, du passage de véhicules, etc. Cette composante d'exposition conduit à moins de $2 \mu\text{Sv an}^{-1}$ en moyenne pour l'individu (UNSCEAR, 1993). La deuxième composante d'exposition interne est liée aux descendants à vie longue du radon formés dans l'air. Le ^{210}Pb , avec des teneurs dans l'air de l'ordre de $0,5 \text{ mBq m}^{-3}$, contribue à lui seul pour 70 % de la dose totale par inhalation ($10 \mu\text{Sv an}^{-1}$).

4.2.2. Ingestion

Le potassium est un élément essentiel qui se trouve sous contrôle homéostatique dans l'organisme. Le rapport entre l'isotope radioactif du potassium (^{40}K) et le potassium stable est égal à $1,18 \times 10^{-4}$. La concentration moyenne de ^{40}K dans l'organisme est d'environ 55 Bq kg^{-1} . Il en résulte une dose efficace annuelle moyenne estimée à $0,17 \text{ mSv}$.

Les doses qui sont dues aux familles naturelles radioactives de l'uranium et du thorium sont variables selon les quantités incorporées *via* la chaîne alimentaire. Des estimations ont été faites par l'UNSCEAR (Tab. II).

TABLEAU II

Incorporation annuelle moyenne et dose efficace annuelle correspondante pour les familles de ^{235}U , de ^{238}U et de ^{232}Th (UNSCEAR, 1993).

Average annual intake and annual effective dose from the series of ^{235}U , ^{238}U and ^{232}Th (UNSCEAR, 1993).

Radionucléide	Incorporation annuelle (Bq)		Dose efficace annuelle (mSv)	
	Ingestion	Inhalation	Ingestion	Inhalation
^{238}U	4,9	0,0069	0,12	0,21
^{234}U	4,9	0,0069	0,15	0,21
^{230}Th	2,5	0,0035	0,18	0,18
^{226}Ra	19	0,0035	30,8	0,01
^{210}Pb	32	3,5	32	7
^{210}Po	55	0,35	11	0,35
^{232}Th	1,3	0,0069	0,52	1,4
^{228}Ra	13	0,0069	3,9	0,01
^{228}Th	1,3	0,0069	0,009	0,69
^{235}U	0,2	0,0004	0,01	0,01
TOTAL			52	10

Les radionucléides qui contribuent le plus à l'exposition interne, en dehors du radon, sont le ^{226}Ra , le ^{210}Pb et le ^{210}Po . Le radium se concentre dans les parties aériennes des céréales et les fruits secs. Le ^{210}Po est relativement abondant dans les poissons ($\sim 2400 \text{ Bq kg}^{-1}$), davantage encore dans les crustacés ($\sim 600 \text{ Bq kg}^{-1}$) et les mollusques ($\sim 15000 \text{ Bq kg}^{-1}$). À titre anecdotique, le ^{210}Po ainsi que le ^{210}Pb sont également abondants dans la viande de caribou, cet animal consommant de grandes quantités de lichens sur lesquels se déposent ces deux radioéléments de l'atmosphère.

4.2.3. Eau de consommation

L'eau de source et les eaux minérales se chargent en radioactivité naturels au cours de la traversée des roches encaissantes par suite de la dissolution des radionucléides. La radioactivité de l'eau ne reflète cependant que partiellement celle des sols traversés et dépend davantage de la composition chimique de l'eau. Les eaux de surface sont en moyenne peu radioactives, celles minérales gazeuses le sont généralement davantage. L'activité bêta est essentiellement due au ^{40}K . Les eaux de source et minérales contiennent d'autre part les éléments des familles naturelles de l'uranium et du thorium, en particulier le radium et les descendants à vie longue du radon. Un bilan portant sur 255 eaux hydrothermales a été réalisé en France par le SCPRI (Rémy et Pellerin, 1982 ; Rémy et Lemaître, 1990).

Les valeurs maximales ont été observées par Rémy et Lemaître en 1998, pour l' ^{238}U dans les eaux de Badoit St-Galmier (900 mBq L^{-1}), et celles de St-Yorre Royale pour le ^{228}Th (28 mBq L^{-1}) et le ^{226}Ra (250 mBq L^{-1}). Certaines eaux – notamment celles riches en cations (Na et K) – peuvent contenir plusieurs Bq par litre de ^{226}Ra (Ortégua, 1996).

À partir des mesures concernant les eaux minérales françaises, Métivier et Roy (1997) ont calculé les doses engagées que recevraient les consommateurs ne buvant que ces eaux minérales. Pour un adulte qui ne consommerait qu'une eau faiblement radioactive comme l'eau d'Evian, la dose annuelle engagée sur 50 ans serait voisine de $0,03 \text{ mSv}$. Pour un nourrisson, la dose engagée jusqu'à l'âge de 70 ans par la consommation durant la première année de vie serait de $0,35 \text{ mSv}$. Pour un adulte qui consommerait quotidiennement une eau gazeuse saline, la dose efficace engagée annuelle serait comprise entre $0,02 \text{ mSv}$ (eau de Perrier) et $1,24 \text{ mSv}$ (eau de St Alban).

4.3. Le radon

Le radon et ses descendants à vie courte sont les radionucléides qui contribuent le plus à l'exposition de l'individu.

4.3.1. Historique

Tandis qu'il étudie la radiation du thorium en 1899, Ernest Rutherford, physicien à Cambridge puis à l'université McGill à Montréal, constate un comportement erratique de son électromètre notamment affecté par une simple ouverture de la porte ou des fenêtres du laboratoire. Les mesures devenant reproductibles lorsque le thorium se trouve placé dans une boîte étanche, il conclut à l'existence d'une « émanation » radioactive qui perturbe ces mesures. Il détermine avec le chimiste Frédéric Soddy que cette « émanation » est issue, non pas du thorium lui-même, mais d'une substance qu'il nomme thorium X (actuel ^{224}Ra). Ils classeront finalement cet élément dans le groupe des gaz inertes et l'appelleront thoron (^{220}Rn). En 1901, Dorn découvre le radon (^{222}Rn). L'actinon (^{219}Rn), troisième et dernier isotope naturel du radon, est découvert par Giesel en 1902.

4.3.2. Exposition à l'air libre

La source principale de radon dans l'atmosphère est constituée par le sol et, dans une moindre mesure, l'eau. Son émanation par le sol est fonction de la nature du sol et de sa teneur en radium. Les conditions météorologiques jouent un rôle également non négligeable. Au niveau du sol, la concentration du radon dans l'air varie au cours de la journée, avec généralement des valeurs minimales pendant la journée et maximales pendant la nuit. Les concentrations à l'air libre sont comprises typiquement entre $0,1 \text{ Bq m}^{-3}$ (environnement marin) et 100 Bq m^{-3} (terrain granitique uranifère). On peut retenir une valeur moyenne de l'ordre de 10 Bq m^{-3} à 1 m de hauteur sur un sol standard. Les concentrations diminuent rapidement avec l'altitude.

4.3.3. Exposition dans les bâtiments

Le radon pénètre dans les habitations à partir du sol sous-jacent et des matériaux de construction. Dans certains cas, le gaz naturel et l'eau du robinet apportent aussi du radon. Enfin, l'air extérieur peut être une source significative selon les caractéristiques de la ventilation. Les concentrations sont extrêmement variables selon les lieux et les types de maison. Elles s'échelonnent typiquement entre 10 et $10\,000 \text{ Bq m}^{-3}$, en fonction des caractéristiques géologiques du sous-sol, des caractéristiques architecturales du bâtiment, de la localisation de la pièce dans l'habitation et du mode de vie des occupants. La concentration moyenne à l'échelle du globe est évaluée à 40 Bq m^{-3} (UNSCEAR, 1993). Les concentrations élevées sont le plus souvent liées à des phénomènes de transport du radon dans le sol sous l'habitat, à une mauvaise étanchéité de la maison ainsi qu'à une mauvaise ventilation. Certains matériaux de construction riches en radium (schistes alunifères, granites, résidus phosphatés) peuvent également expliquer une forte concentration en radon dans une maison. Les campagnes de mesure réalisées en France par l'IPSN conduisent à une valeur moyenne (arithmétique) de 65 Bq m^{-3} . Les concentrations moyennes

les plus élevées sont observées dans les départements à sous-sol granitique, celles les plus faibles dans les départements à sous-sol sédimentaire (Robé et Pirard, 1998).

4.3.4. Descendants du radon

Le risque associé au radon résulte de l'inhalation de ses descendants solides à vie courte, notamment ceux émetteurs alpha. L'équilibre (ou plutôt le déséquilibre) radioactif entre le radon et ses descendants est fonction de multiples paramètres : la taille des aérosols ambiants, leur concentration dans l'air, le taux de renouvellement d'air. Dans une maison standard, le « facteur d'équilibre » est de l'ordre de 0,4 contre 0,6 environ à l'air libre (Rannou, 1985).

4.3.5. Dosimétrie du radon

La dosimétrie du radon constitue sans doute l'un des sujets les plus difficiles et controversés de la radioprotection. Des estimations des facteurs de dose ont été établies successivement par différents comités scientifiques mais elles restent toujours matière à discussion. La valeur admise par l'UNSCEAR dans son rapport de 1993 est de 9 nSv h⁻¹ par Bq m⁻³ de radon à l'équilibre avec ses descendants. En admettant des concentrations de ²²²Rn dans l'air de 40 Bq m⁻³ dans les bâtiments (avec un facteur d'équilibre de 0,4 et un taux d'occupation de 80 %) et 10 Bq m⁻³ à l'air libre (avec un facteur d'équilibre de 0,8 et un taux d'occupation de 20 %), la dose efficace moyenne due au radon est de 1,3 mSv par an.

4.3.6. Thoron

Le thoron – ou ²²⁰Rn – est présent en quantité nettement plus faible dans l'atmosphère en raison de sa plus courte période (55,6 s). Sa teneur est de l'ordre de 10 Bq m⁻³ à l'air libre et 3 Bq m⁻³ dans l'air des bâtiments. Les matériaux de construction et les revêtements sur les murs jouent un rôle important tandis que la ventilation a peu d'influence. La dose efficace annuelle attribuable aux descendants du thoron est estimée à 69 µSv par l'UNSCEAR (1993).

5. Exposition naturelle renforcée par l'homme

Certaines activités industrielles sont susceptibles d'augmenter, localement ou à plus grande échelle, l'exposition du public aux rayonnements naturels.

5.1. Industries extractives

Il s'agit des activités d'extraction, de transformation ou de dispersion de matériaux terrestres – ou ceux qui en sont dérivés – naturellement riches en radionucléides.

Ces activités génèrent des expositions qui restent encore aujourd'hui relativement mal quantifiées : d'une part les données de mesure sont souvent éparées, d'autre part les évaluations de dose reposent sur des modèles comportant de nombreuses inconnues ou incertitudes. Ces modèles ne permettent d'évaluer au mieux que des doses *per caput*³ et non de réelles doses individuelles. Des évaluations de ce type ont été faites par l'UNSCEAR pour les activités industrielles les plus marquantes : énergies fossiles (charbon, fuel), gaz naturel, énergie géothermique, industrie des phosphates. Elles sont résumées dans le tableau III.

TABLEAU III

Doses reçues par le public en relation avec des activités augmentant l'irradiation naturelle.
Doses received by the public related to enhanced natural radiation.

Activités	Radionucléides	Dose moyenne <i>per caput</i>
Charbon		
- extraction	radon	0,1 à 2 nSv/an
- combustion dans usine thermique	tous radionucléides	2 µSv/an
- usage domestique	tous radionucléides	0,4 à 8 µSv/an
- utilisation des cendres	tous radionucléides	5 µSv/an
centrale thermique au fuel	tous radionucléides	10 nSv/an
centrale thermique au gaz	radon	1 nSv/an
exploitation de l'énergie géothermique	radon	1 nSv/an
Phosphates		
- extraction, transformation, rejets	famille ²³⁸ U	pas de données mondiales ^a
- utilisation d'engrais	famille ²³⁸ U	2 µSv/an

^a Une étude en Hollande a conduit à estimer des doses efficaces individuelles maximales de 150 µSv/an pour la population consommant des produits marins contaminés (essentiellement du ²¹⁰Po) par les rejets phosphatés (UNSCEAR, 1993).

5.2. Produits de consommation

Il existe – ou a existé par le passé – de nombreux produits contenant des radionucléides en quantité relativement importante et donc responsables d'une exposition pour leurs « consommateurs ». Avant que le tritium ne soit devenu le seul radionucléide utilisé dans l'industrie horlogère, le ²²⁶Ra a été intégré pendant de nombreuses années à des peintures pour éclairer les cadrans de montre. Des appareils antistatiques contiennent des sources de ²¹⁰Po. Le thorium est utilisé dans des manchons de lampe à gaz, etc. Enfin, le tabac contient du ²¹⁰Po et du ²¹⁰Pb qui contribuent à la dose interne des fumeurs.

³ La dose « per caput » est obtenue par le quotient de la dose collective subie par une population concernée par la source d'exposition et du nombre de personnes dans cette population.

Les évaluations des doses consécutives à la consommation de tous ces produits sont sujettes à de grandes incertitudes. Quoiqu'il en soit, dans l'état des connaissances actuelles, les doses reçues sont très faibles par rapport aux irradiations correspondant au bruit de fond radiatif « normal » et participent très peu au bilan radiologique général.

6. Bilan radiologique général

Le tableau IV résume l'ensemble des composantes et valeurs d'exposition associées aux différentes sources de rayonnements naturels. Les calculs qui conduisent à ces valeurs sont basés sur des données de mesure à l'échelle du globe, dont le nombre et la qualité sont sans cesse croissants.

Tableau IV
Valeurs représentatives de l'exposition aux rayonnements naturels (Bennett, 1997).
Representative values of natural radiation exposure.

Composante d'exposition	Dose efficace annuelle en mSv	
	Région à bruit de fond radiatif moyen	Région à bruit de fond radiatif élevé
Exposition externe		
Rayonnements cosmiques	0,38	2,0
Radionucléides terrestres	0,46 ^a	4,3
Exposition interne		
Radionucléides cosmogéniques	0,01	0,01
Radionucléides terrestres	0,23 ^b	0,6
Radon	1,2	10
Thoron	0,07	0,1
TOTAL	2,4	

^a en considérant les contributions suivantes : ^{40}K = 0,12 mSv, famille ^{232}Th = 0,21 mSv et famille ^{238}U = 0,13 mSv,

^b dont 0,17 mSv dus au ^{40}K et 0,06 mSv dus aux familles du thorium et de l'uranium.

Il s'avère aujourd'hui que les incertitudes principales entachant les estimations de dose sont dues aux incertitudes des modèles dosimétriques permettant la conversion d'exposition en dose. Le radon est sans doute le radionucléide pour lequel les incertitudes sont les plus grandes, mais il en existe aussi pour les rayonnements cosmiques (données insuffisantes sur les doses dues aux neutrons et aux ions lourds aux altitudes élevées), et les radionucléides ingérés (connaissance fragmentaire des quantités d'activité ingérées pour l'ensemble des radionucléides et des aliments).

7. Conclusion

La radioactivité naturelle est omniprésente sur la terre. D'origine à la fois cosmique et terrestre, elle expose les individus par voie externe et interne. La valeur totale de cette exposition pour l'homme a sans doute peu varié au cours des temps sauf au cours des dernières années où de nouvelles « pratiques » sont apparues : en particulier le plus grand confinement des habitations est responsable d'une augmentation des concentrations de l'air en radon, de même les transports aériens exposent aujourd'hui le personnel navigant mais aussi les passagers au rayonnement cosmique. Il faut également souligner que le régime alimentaire des populations a sensiblement évolué. De plus en plus, les produits locaux laissent la place à des produits importés de différentes provenances. Il s'ensuit sans doute une moindre grande disparité des incorporations entre différents groupes de populations.

Néanmoins, l'exposition aux rayonnements naturels reste fortement variable selon les lieux et en fonction des habitudes des personnes du public. L'étude des sources de rayonnements naturels permet de mieux comprendre le comportement des (radio)éléments dans la nature. La connaissance des expositions qui en résultent pour l'homme est elle-aussi utile, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ces expositions sont plus importantes que celles d'origine artificielle (industrielle ou médicale). Leur étude apporte des données intéressantes pour la 'gestion' de la radioactivité artificielle (point zéro, comparaison des différentes sources et voies d'exposition, comparaison des risques...). Enfin, les études s'avèrent aujourd'hui fondées pour gérer le risque éventuel (radon, rayonnements cosmiques).

Le problème des effets des rayonnements ionisants s'est posé d'une manière de plus en plus évidente avec l'utilisation grandissante des rayonnements artificiels, à la fois sources de bénéfices et de progrès (médecine nucléaire, énergie nucléaire) mais aussi d'accidents de grande ampleur (retombées de Tchernobyl). Parallèlement, la radioactivité naturelle qui contribue le plus en moyenne à l'exposition radiologique de l'homme est devenue un élément important à prendre en compte dans le développement des stratégies générales de santé public et des principes de radioprotection applicables aux populations générales mais aussi à certaines catégories de travailleurs plus particulièrement exposées.

RÉFÉRENCES

- Bennett B.G. (1997) *Exposures to natural radiation worldwide*. in High levels of natural radiation 1996, radiation dose and health effects. (Luxin Wei, Tsutomu Sugahara, Zufan Tao Editors.) Elsevier.
- Bottollier-Depois J.F. (1997) *Évaluation de l'exposition au rayonnement cosmique à bord d'avion long courrier*. Rapport IPSN SDOS/97-01.

CONNAISSANCE ACTUELLE DES SOURCES D'IRRADIATION NATURELLE

- Bottollier-Depois J.F., Lebaron-Jacobs L., Siegrist M., Duvivier E., Almarcha B., Dachev T.P., Semkova J.V., Matviichuk Y.N., Koleva R.T., Tomov B.T., Baynov P.T., Petrov V.M., Shurshakov V.V., Bengin V., Koslova S.B. (1996) Tissue equivalent detector data obtained recently on Mir space station. Comparison with solid state detector data. *Adv. Space Res.* **18**, (12)171-(12)174.
- Capdevielle J.N. (1984) *Les rayons cosmiques*. coll. Que Sais-je. N°729 PUF.
- Delpoux M. (1974) *Etude expérimentale des effets de la radioactivité naturelle tellurique sur les végétaux. Hypothèses sur l'influence de l'environnement fortement énergétique des êtres vivants*. Thèse, Toulouse.
- McAulay I.R., Schrewe U.J., Bartlett D.T., Bottollier-Depois J.F., Dietze G., Gmür K., Grillmaier R.E., Heinrich W., Lim T., Lindborg L., Menzel H.G., Reitz G., Schnuer K., Schraube H., Spurny F., Tommasino L. (1996) *Exposure of Air crew to cosmic radiation*. EURADOS report 1996-01. European Commission. McAulay et al. Editors, Luxembourg.
- Métivier H., Roy M. (1997) *Dose efficace liée à la consommation d'eau minérale naturelle par l'adulte et le nourrisson*. *Radioprotection* **32**, 491-499.
- Ortége X., Valles I., Serrano I. (1996). *Natural radioactivity in drinking water in Catalonia (Spain)*. *Environmental International* **22**, Suppl. 1, S347-S354.
- Rannou A. (1985). *Contribution à l'étude du risque lié à la présence du radon-220 et du radon-222 dans l'atmosphère des habitations*. Thèse, Brest.
- Rémy M.L., Pellerin P. (1982) Quelques données récentes sur la radioactivité naturelle des sources hydrothermales françaises. *Presse thermique et climatique* **119**, 3, 150-155.
- Rémy M.L., Lemaître N. (1990) Eaux minérales et radioactivité. *Hydrogéologie* **4**, 267-278.
- Robé M.C., Pirard Ph. (1998) *Le radon*. Congrès SFRP sur les Irradiations d'origine naturelle en France. Poitiers, 17 et 18 mars 1998.
- United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993) *United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation*. 1993 Report to the General Assembly, with Annexes. United Nations sales publication E.94.IX.2 United Nations, New-York, 1993.