

# LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE en 10 épisodes

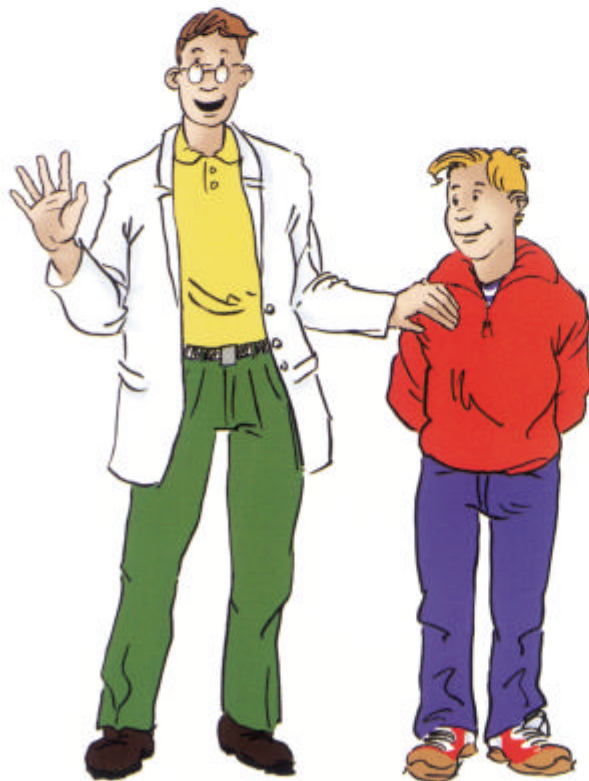


# LES IRRADIATIONS D'ORIGINE NATURELLE



Bonjour !  
Je vous présente Tom  
qui va vous faire découvrir  
sa famille.

Vous allez voir que chacun  
dans sa région, dans sa maison,  
dans son travail, est exposé en permanence  
à toutes les sources naturelles  
de rayonnements.



La grand-mère



La mère



Le père



La sœur Sophie

## Ont contribué à l'élaboration de ce livret

J.F. Bottollier-Depois, S. Charmasson, L. Foulquier, P. Germain, D. Klein, J. Levrard, P. Livolsi, J. Lochard, J. Lombard, M. Masson, H. Maubert, H. Métivier, A. Rannou, V. Tort.

J.Y. Pipaud (conception), R. Poulard (dessin),  
M. Beugin (mise en couleur et mise en page)  
CLAIR-SOLEIL NEW imprimerie – Aubagne

## Repères

**La période** est le temps que met une source radioactive pour perdre la moitié de sa radioactivité. Elle est très différente d'un radionucléide à l'autre :

radon 222 : 3,8 jours  
béryllium 7 : 53,6 jours  
polonium 210 : 138 jours  
tritium : 12,3 ans  
radium 226 : 1620 ans  
carbone 14 : 5730 ans

uranium 235 : 740 millions d'années  
potassium 40 : 1,3 milliard d'années  
uranium 238 : 4,5 milliards d'années  
thorium 232 : 14 milliards d'années  
rubidium 87 : 47 milliards d'années  
cérium 142 :  $5 \cdot 10^{16}$  ans

**Le becquerel (Bq)** est l'unité de mesure de la radioactivité. 1 Bq correspond à une désintégration par seconde du noyau d'un atome. Les désintégrations s'accompagnent de l'émission de rayonnements.

**Le sievert (Sv)** est l'unité de dose qui exprime l'effet des rayonnements sur l'homme. On emploie souvent son sous-multiple, le millisievert (mSv).

En exposition externe, la dose reçue dépend de très nombreux paramètres : caractéristiques de la source, position de l'individu par rapport à la source, écrans de protection entre l'individu et la source ... En exposition interne, il y a, entre becquerel et sievert, une relation complexe qui dépend du radionucléide (donc de sa forme physico-chimique et du type de rayonnement qu'il émet), du mode d'incorporation (ingestion ou inhalation) et de l'âge de l'individu.

**Par exemple, un adulte reçoit une dose de 1 mSv ...**

**... s'il ingère :**

55 millions de Bq de tritium  
ou 1,7 million de Bq de carbone 14  
ou 200 000 Bq de potassium 40  
ou 25 000 Bq d'uranium 238  
ou 4 200 Bq de polonium 210  
ou 3 500 Bq de radium 226

**... ou s'il inhale :**

55 millions de Bq de tritium  
ou 1,7 million à 1,2 milliards de Bq de carbone 14\*  
ou 400 000 Bq de potassium 40  
ou 140 à 2 000 Bq d'uranium 238\*  
ou 330 à 1 700 Bq de polonium 210\*  
ou 60 Bq de radium 226  
(\*selon la forme physico-chimique)

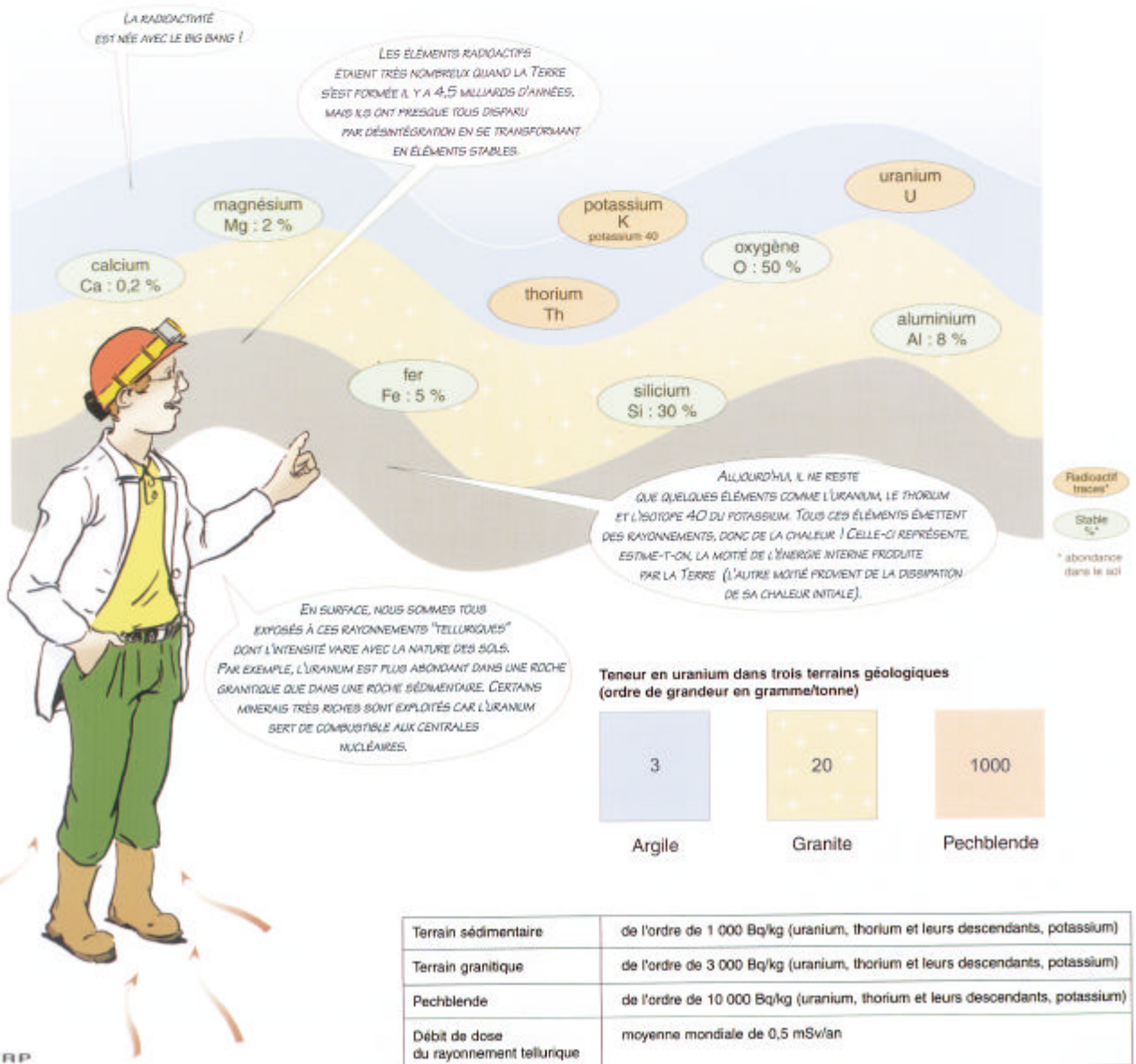
## Bibliographie

- J.F. Bottollier-Depois (1996), Dosimétrie du rayonnement cosmique à l'aide de NAUSICCA, Clefs CEA n° 32, p. 48 à 59.  
A. Cachon, L. Jauneau, A. Daudin (1964), Les rayons cosmiques, Que Sais-je ? n° 729.  
J.N. Capdevielle (1984), Les rayons cosmiques, Que Sais-je ? n° 729.  
H. Métivier (1998), Les sources d'irradiation par les rayonnements ionisants, Nucléaire, Sécurité et Protection, Les Techniques de l'Ingénieur, "Génie Energétique".  
H. Métivier, M. Roy (1997), Dose efficace liée à la consommation d'eau minérale naturelle par l'adulte et le nourrisson, Radioprotection Vol. 32, n° 4, p. 491 à 499.  
J. Pradel (1987), La radioactivité naturelle, Radioprotection Vol. 22, n° 4, p. 291 à 308.  
A. Rannou, A. Bouville, L. Jeanmaire, Articles parus dans : Congrès sur les données actuelles sur la radioactivité naturelle, Monte Carlo, 5-7 novembre 1984.  
A. Rannou (1997), Protection against Occupational exposure to Natural Sources, à paraître dans Radioprotection.  
L. Richard (1996), Coup de vieux sur le carbone 14, Les Défis du CEA n° 45, p. 22 à 24.  
M.C. Robé (1995), Les sources naturelles de rayonnement, Rapport IPSN DPEI/95-02.

Pour en savoir plus :

Sixth International Symposium on The Natural Radiation Environment (NRE-VI), Montreal, Quebec, Canada, 5-9 June 1995

# SPÉLÉO EN FAMILLE



Environ 340 nucléides existent dans la nature. Parmi ceux-ci 70 sont radioactifs : ce sont des radionucléides.

Les radionucléides présents au moment de la formation de la Terre sont appelés "primordiaux". Ceux dont la période est inférieure à 100 millions d'années sont devenus indécélables. Il subsiste aujourd'hui une vingtaine de radionucléides primordiaux dont les périodes vont de 740 millions d'années pour l'uranium 235 à  $5 \cdot 10^{16}$  ans pour le cérium 142. Certains, comme le potassium 40 et le rubidium 87 se désintègrent en donnant un élément stable. D'autres produisent une série de descendants radioactifs appelés "radionucléides secondaires". Ce sont les familles radioactives de l'uranium 238, du thorium 232 et de l'uranium 235.

Une tonne de terre contient en moyenne 5 g de potassium 40, 3 g d'uranium et 10 g de thorium. Les concentrations semblent faibles, mais les quantités sont énormes à l'échelle d'un pays (le sol de France renferme sur un mètre de profondeur un million de tonnes d'uranium). En réalité, la concentration des radionucléides primordiaux varie d'une roche à l'autre. Elle est trois fois plus élevée dans les terrains granitiques du Massif Central, de Bretagne et de Corse que dans les sols sédimentaires du Bassin Parisien. Elle est 100 à 1000 fois plus élevée dans certains massifs granitiques "uranifères". Des gisements existent partout dans le monde, y compris en France.

L'uranium a une histoire extraordinaire, car les découvertes successives faites à son sujet ont constamment renouvelé son intérêt et son utilisation. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, des mineurs de Bohême qui exploitaient l'argent, découvrent un minerai lourd, noir et brillant qu'ils appellent "pechblende". Le minéralogiste et chimiste allemand Martin Heinrich Klaproth identifie le métal en 1789 et le baptise Uran en souvenir de la découverte 8 ans plus tôt de la planète Uranus. Au XIX<sup>e</sup> siècle, l'uranium était utilisé pour la coloration du verre. En 1896, le Français Henri Becquerel découvre la radioactivité naturelle en constatant que l'uranium émet des rayonnements (une plaque photographique, posée contre une boîte de sel d'uranium, a été impressionnée par celui-ci). En 1939, les allemands Lise Meitner, Otto Hahn et Fritz Strassman découvrent que l'uranium est fissile et constitue une source très dense d'énergie (fission de l'isotope 235 de l'uranium par l'action d'un neutron). L'uranium est aujourd'hui le combustible de base des centrales nucléaires.

Dans les roches, les radionucléides primordiaux et secondaires se désintègrent en émettant des rayonnements : en tout lieu, tout être humain sans exception est exposé à ce rayonnement appelé "tellurique".

En profondeur, l'énergie du rayonnement est dissipée sous forme de chaleur en quantité non négligeable puisqu'elle contribue pour moitié à la chaleur dégagée par la Terre. L'autre moitié est liée au refroidissement du globe, c'est à dire à la dissipation progressive de l'énergie stockée lors de sa formation. Ce flux de chaleur permanent est bien connu des mineurs de fond : la température de la Terre augmente avec la profondeur, d'environ 1°C tous les 30 mètres. La Terre produit ainsi chaque seconde une quantité de chaleur évaluée à  $42 \cdot 10^{12}$  watts dont  $20 \cdot 10^{12}$  sont dus à la radioactivité (40% par  $^{238}\text{U}$ , 40% par  $^{232}\text{Th}$ , 20% par  $^{40}\text{K}$ ).

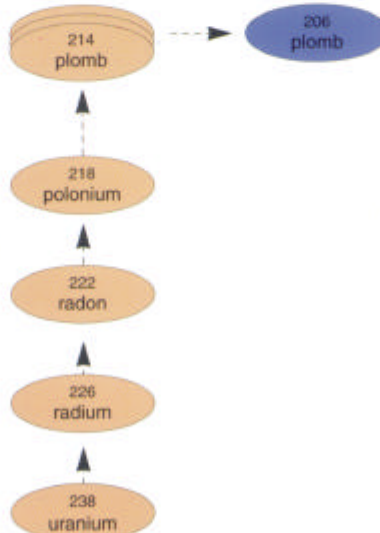
Symboles : uranium = U, thorium = Th, potassium = K, cérium = Ce, rubidium = Rb

# RÉSURGENCE



En 1896, Henri Becquerel s'aperçoit que l'uranium émet des rayonnements : il découvre la radioactivité naturelle ! 2 ans plus tard, Pierre et Marie Curie découvrent qu'en émettant ses rayonnements, l'uranium se transforme en d'autres éléments.

Tous ces radionucléides font partie des roches de la croûte terrestre. Peuvent-ils remonter à la surface ? OUI ! Grâce, par exemple, aux eaux qui circulent dans les roches et se minéralisent avant de resurgir... à une source ou une station thermale.

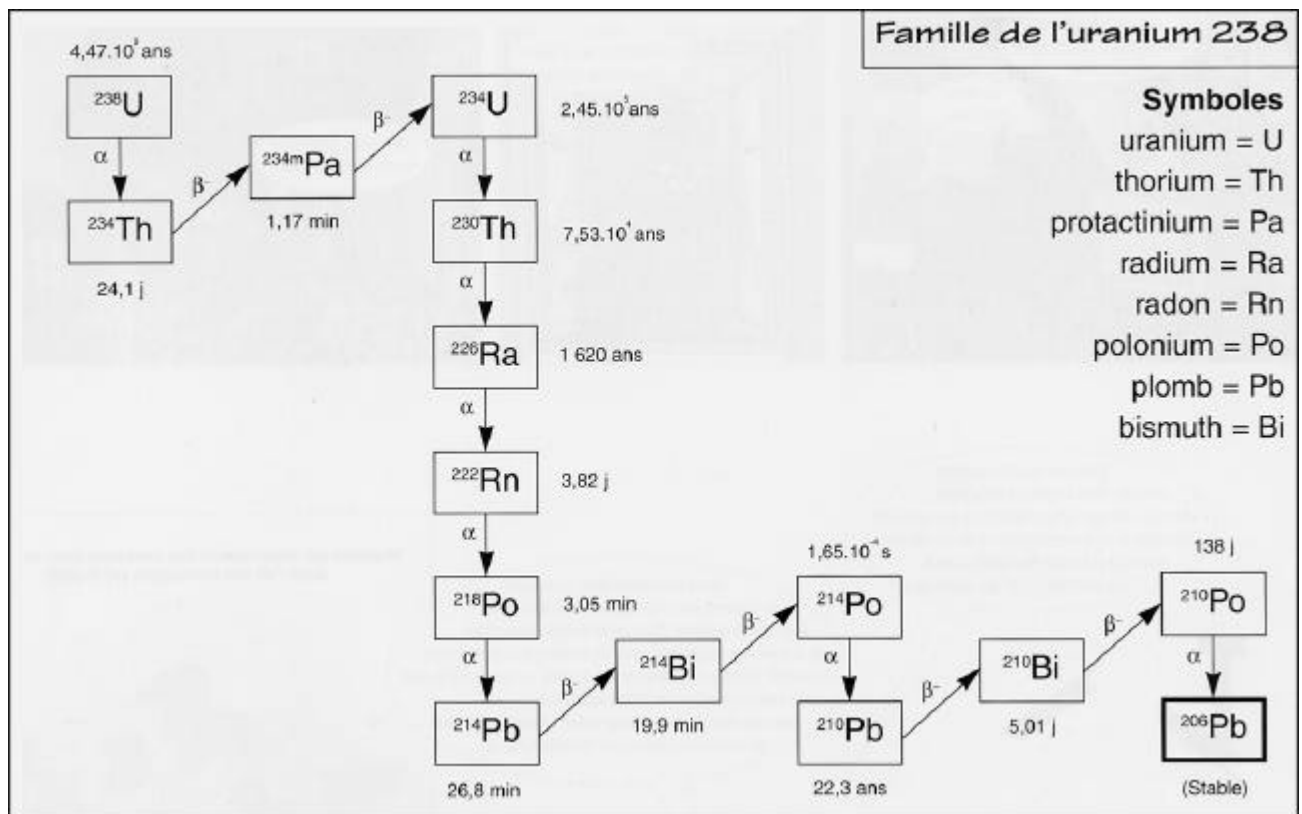


Ils appellent celui-ci radium (l'élément "brillant"), celui-là polonium (Marie était polonaise). L'uranium 238 est le "père" d'une famille radioactive nombreuse, car il subit une bonne dizaine de transformations par désintégrations successives avant de devenir un isotope stable du plomb.



Eau de pluie	entre 0,3 et 1 Bq/L (uranium, radium)
Eau minérale	entre 2 et 4 Bq/L (uranium, radium)

Juste après la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie entreprirent des travaux sur la pechblende ( $U_3O_8$ ). Une fois l'uranium extrait, ils constatèrent que les résidus restaient radioactifs ! Ils poursuivirent la séparation chimique des différents constituants du minerai jusqu'à obtenir, en 1898, deux nouveaux éléments beaucoup plus radioactifs que l'uranium : le polonium et le radium. Mais les fractions restantes restaient toujours radioactives... Durant 10 ans, une multitude de radionucléides, extraits et purifiés en quantités infimes, furent découverts. Peu à peu, on établit entre eux des filiations, et la famille de l'uranium 238 se constitua :



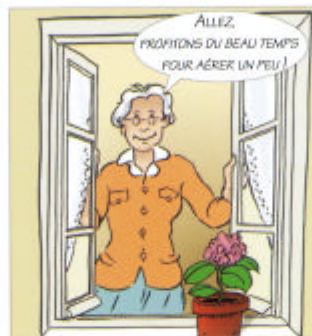
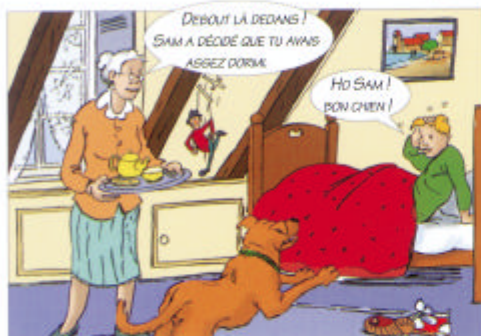
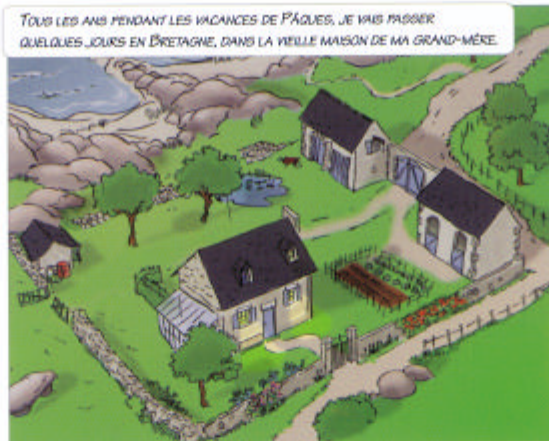
Parmi les descendants de l'uranium 238, il faut retenir le radium 226 pour son utilisation en curiethérapie, ainsi que le gaz radon 222 et ses descendants solides, composante essentielle de la radioactivité naturelle qui atteint l'homme.

Le radium fut employé dès le début du siècle pour traiter les cancers ; la médecine en a utilisé environ 1,5 kg dans le monde jusqu'en 1950, avant de le remplacer par des isotopes radioactifs artificiels. Il a connu d'autres utilisations aujourd'hui interdites. Les peintures chargées de radium ont été utilisées jusqu'en 1960 pour rendre luminescents les cadrans de montre. Depuis, l'industrie horlogère emploie du tritium, beaucoup moins nocif.

Tous ces radionucléides sont présents dans le sol. Qu'en est-il des eaux qui circulent et "lessivent" les roches pendant des années ou des milliers d'années ? Concentrent-elles la radioactivité ? Non. En fait la composition de l'eau en radionucléides ne reflète que partiellement la nature géologique des terrains traversés : tout dépend du caractère chimique de l'eau (elle est d'autant moins minéralisée que son pH est fort) et du degré de solubilité des radionucléides. Les eaux de surface sont très peu radioactives (moins de  $1 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ), les eaux minérales le sont plus (de 2 à  $4 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ). On y retrouve le potassium 40, l'uranium 238 (certaines eaux françaises en contiennent tout de même 80 microgrammes par litre) et quelques uns de ses descendants : le radium 226, le plomb 210 et le polonium 210. Le thorium, très peu soluble, est presque toujours absent.

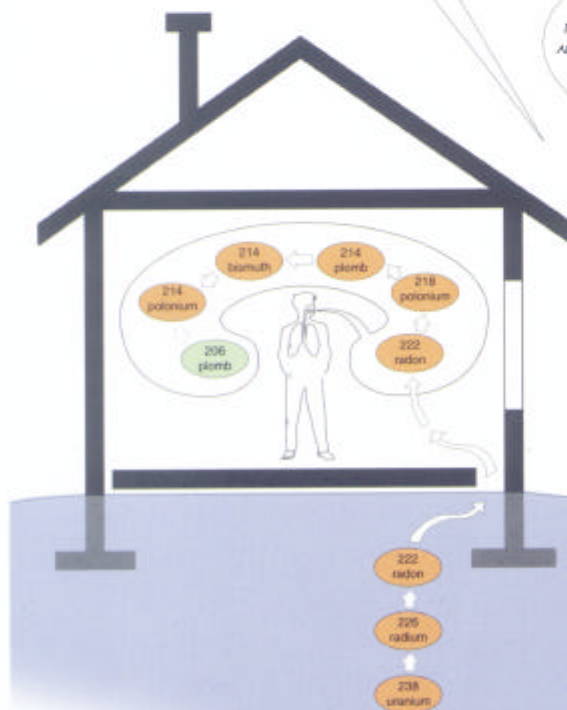
# RADIOACTIVITÉ DE L'AIR

## LA MAISON DE GRAND-MÈRE

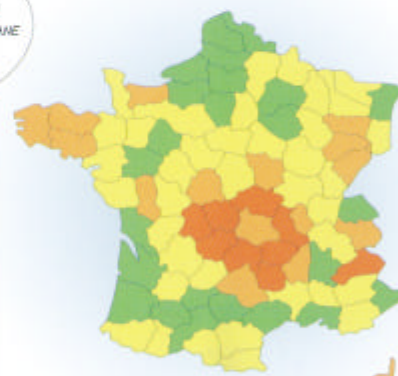


CERTAINS RADIONUCLÉIDES ONT UN AUTRE MOYEN DE REMONTER VERS LA SURFACE : LE RADON EST UN GAZ INCOLORÉ, INODORE, IL S'ÉCHAPPE DU SOL ET SE CONCENTRE DANS LES VOLUMES PEU AÉRÉS COMME LES GROTTES... OU LES MAISONS.

NOUS RESPIRONS DONC DU RADON MAIS AINSI SES DESCENDANTS QUI SE FIXENT SUR LES POUSSIÈRES. PLUS ON RENFORCE L'ISOLATION DE SON HABITATION, PLUS LA CONCENTRATION DE L'AIR EN RADON AUGMENTE ! ET SI LA MAISON EST EN GRANITE, LE RADON QUI ÉMANE DES MURS S'AJOUTE À CELUI QUI VIENT DU SOL. DANS LA MAISON DE LA GRAND-MÈRE, LA CONCENTRATION DE RADON PEUT DÉPASSER 150 Bq/m<sup>3</sup> D'AIR.



Moyenne par département des concentrations de radon dans l'air des habitations (en Bq/m<sup>3</sup>)



- < 50 Bq/m<sup>3</sup>
- 51 - 100 Bq/m<sup>3</sup>
- 101 - 150 Bq/m<sup>3</sup>
- > 150 Bq/m<sup>3</sup>

Source IPSN janvier 97

Extérieur	de 1 à 10 Bq/m <sup>3</sup> d'air (radon)
Maison	de 10 à 1000 Bq/m <sup>3</sup> d'air (radon)
Cavité naturelle	de 1000 à 10 000 Bq/m <sup>3</sup> d'air (radon)



**L**e radon trouve son origine dans les sols où il est formé par désintégration des atomes de radium. La quantité produite est donc liée à la teneur de la roche en radium. Seule une fraction dépendant de la porosité du sol, de la taille des grains et de l'humidité réussit à s'échapper et atteindre l'atmosphère.

**L**e radon possède deux isotopes principaux : le radon 220 ( $^{220}\text{Rn}$ , période 56 secondes) descendant du thorium et le radon 222 ( $^{222}\text{Rn}$ , période 3,8 jours) descendant de l'uranium. En terme d'irradiation, le radon 222 est prédominant.

**U**ne fois dans l'air, le radon se dilue en fonction des conditions atmosphériques. Le jour, la diffusion est bonne et le taux de radon est bas. La nuit, les inversions de température sont fréquentes, la diffusion est mauvaise, le radon stagne au niveau du sol et sa concentration peut augmenter d'un facteur 10 à 100. A la surface de la Terre, le flux moyen d'émission est de 0,022 Bq/m<sup>2</sup>/s pour le radon 222. Les différentes mesures de la concentration en radon 222 dans le monde, sous différents climats et conditions atmosphériques, indiquent une valeur moyenne de 10 Bq·m<sup>-3</sup>, avec des écarts importants (0,1 Bq·m<sup>-3</sup> à 100 Bq·m<sup>-3</sup>). Au dessus des océans, la teneur moyenne est de 2 Bq·m<sup>-3</sup>.

**D**ans les habitations, la teneur en radon dépend des caractéristiques de la maison (vide sanitaire, cave), de la présence de voies de transfert du sol aux différents niveaux d'habitation (canalisation, escalier), du degré de ventilation et des habitudes de vie des occupants (ouverture des portes et fenêtres). Les concentrations dans les habitations sont très variables selon les lieux et les pays : de 10 à 10 000 Bq·m<sup>-3</sup>.

**L**a moyenne des mesures effectuées en France est de 65 Bq·m<sup>-3</sup>, supérieure à la moyenne du Royaume-Uni (20 Bq·m<sup>-3</sup>) et inférieure à celle de la Suède (100 Bq·m<sup>-3</sup>). On estime une valeur moyenne de 40 Bq·m<sup>-3</sup> à l'échelle du globe : cela correspond, pour un litre d'air, à environ 20 000 atomes de radon 222, à comparer au 10<sup>22</sup> atomes d'oxygène !

**A**lors que tous les autres radionucléides naturels atteignent l'homme essentiellement par l'ingestion d'aliments, l'irradiation par le radon est liée à son inhalation. Elle affecte le poumon et plus particulièrement l'épithélium bronchique.

**L**e radon lui-même n'interagit pas directement avec l'organisme. L'irradiation est due à ses descendants émetteurs alpha qui se déposent dans les voies respiratoires. Le calcul de la dose délivrée dépend de plusieurs facteurs, et tout particulièrement de la taille des poussières et aérosols sur lesquels peuvent se fixer les descendants. Le résultat est différent selon que l'on soit à l'extérieur ou à l'intérieur des habitations ; il dépend également d'autres facteurs liés à l'individu (respiration par la bouche ou par le nez, débit respiratoire).

**L'**exposition au radon est la source principale d'irradiation naturelle de l'homme.

Symbole : radon = Rn

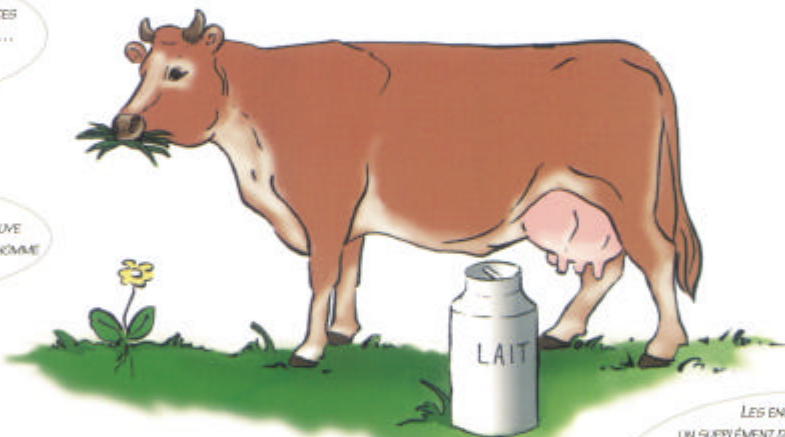
# RADIOACTIVITÉ DE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE

## VACANCES À LA FERME



Comme tous les végétaux,  
l'herbe puise dans le sol des substances  
minérales comme l'azote, le phosphore et...  
le potassium qui contient 0,012 %  
de potassium 40 radioactif.

La vache broute l'herbe  
et ingère ce potassium que l'on retrouve  
dans le lait. Il est ainsi transféré à l'homme  
par la chaîne alimentaire.



Les engrais apportent  
un supplément de radioactivité naturelle  
dans les sols car ils contiennent du potassium,  
de l'uranium et du radium. Contrairement au potassium,  
l'uranium et le radium migrent difficilement dans  
les végétaux. On ne les trouve donc qu'à l'état  
de traces dans les aliments.



Lait	de l'ordre de 80 Bq/L (potassium 40)
Pomme de terre	de l'ordre de 150 Bq/kg (potassium 40)
Engrais	de 500 à 5 000 Bq/kg (uranium 238, radium 226 et potassium 40)

Comme pour l'eau, les concentrations en radionucléides des produits alimentaires sont faibles par rapport aux différents milieux de l'environnement. Les radionucléides migrent plus ou moins dans les chaînes alimentaires, généralement sans se concentrer.

Au bout des chaînes de type :

(sol -> légumes)  
ou  
(sol -> herbe -> vache -> viande ou lait)

on retrouve essentiellement le potassium 40 qui représente 90% de la radioactivité des aliments.

En employant certains engrais, on incorpore dans le sol un "supplément" de radioactivité naturelle, mais les radionucléides concernés, l'uranium 238 et le radium 226, atteignent peu l'homme car ils sont mal transférés dans les chaînes alimentaires.

Les engrais sont principalement produits à partir des minerais phosphatés, exploités en Chine, au Maroc, en ex-URSS et aux Etats Unis. Dans ces minerais, la concentration en potassium 40 et en radionucléides de la famille du thorium 232 est similaire à celle des autres roches. Par contre la concentration en radionucléides de la famille de l'uranium 238 est élevée, surtout pour les minerais phosphatés d'origine sédimentaire ( $1500 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  de  $^{238}\text{U}$ ). Dans certains engrais, on mesure des activités de  $4000 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  d'uranium 238 et de  $1000 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  de radium 226 (l'utilisation d'engrais est probablement la première source de contamination de la planète par le  $^{226}\text{Ra}$ ).

Le transfert de radioactivité de l'environnement à l'homme se caractérise par le "facteur de transfert" Ft. Pour le transfert (sol -> végétal) Ft est le rapport entre la radioactivité de 1 kg de végétal et la radioactivité de 1 kg du sol concerné. Par exemple, si on mesure une radioactivité de  $150 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  pour une pomme de terre qui pousse dans un sol à  $1500 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ , on en déduit un facteur Ft de 0,1.

Dans les chaînes alimentaires terrestres, Ft est pratiquement toujours inférieur à 1. Il existe quelques exceptions où l'un des maillons concentre la radioactivité. La plus connue est la chaîne (sol -> lichen -> renne). Elle concerne quelques dizaines de milliers de personnes qui vivent dans les zones arctiques et subarctiques et qui mangent abondamment de la viande de renne ou de caribou. Ces animaux se nourrissent pendant l'hiver de lichens qui ont la caractéristique d'accumuler le polonium 210.

Les lichens comme les mousses ont la capacité de fixer les radionucléides. Ils constituent d'excellentes "balises" pour surveiller la radioactivité de l'environnement. C'est la raison pour laquelle on les appelle "bioindicateurs".

Symboles : uranium = U, radium = Ra

# PÊCHE À PIED



PARMI LES SELS DISSOUS DANS L'EAU DE MER, ON TROUVE DU POTASSIUM, TOUJOURS LIÉ AVEC SES 0,012 % DE POTASSIUM RADIOACTIF, MAIS AUSSI DE L'URANIUM ET DU TRITIUM. COMME LES EAUX DE SOURCE, L'EAU DE MER EST RADIOACTIVE...

QUEL EST LE POINT COMMUN ENTRE UNE POMME DE TERRE ET UNE HÛTRE ? LES DEUX SONT CULTIVÉES ! L'UNE DANS LA TERRE, L'AUTRE EN MER.

MAIS LA COMPARAISON S'ARRÊTE LÀ. LA POMME DE TERRE N'INCORPORE QU'UNE PARTIE DE LA RADIOACTIVITÉ DU SOL DANS LEQUEL ELLE POUSSÉ ALORS QUE LES MOLLUSQUES, QUI PÈCHENT DE GRANDES QUANTITÉS D'EAU, FIXENT LES RADIONUCLÉIDES ET CONCENTRENT LA RADIOACTIVITÉ DE L'EAU DE MER.

Radioactif traces\*  
Stable %\*  
 \* abondance dans la mer

Eau de mer	de l'ordre de 13 Bq/L (potassium 40, traces d'uranium et de tritium)
Huîtres	de l'ordre de 50 Bq/kg (potassium 40, traces d'uranium et de tritium)
Poisson	de l'ordre de 100 Bq/kg (potassium 40, traces d'uranium et de tritium)

L'eau de mer présente une radioactivité naturelle totale de l'ordre de  $13,5 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ . Le potassium 40 et le rubidium 87 représentent respectivement 90 % et 1 % de cette radioactivité naturelle. Tous les radionucléides naturels sont présents dans l'eau de mer.

Les sédiments marins, sables des plages, vases des ports, contiennent en plus ou moins grande abondance du potassium 40 et des éléments du groupe uranium-thorium ainsi que leurs descendants. La radioactivité naturelle des sédiments est de l'ordre de 40 à  $1\,000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  sec. Les algues contiennent entre 100 et  $450 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  frais de potassium 40, les crustacés et mollusques entre 50 et  $200 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  frais et les poissons entre 20 et  $400 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  frais. L'eau de mer au large contient  $12 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$  de potassium 40.

La radioactivité naturelle évolue selon des cycles annuels propres à chaque organisme. Ainsi la radioactivité due au potassium 40 chez les algues brunes comme le fucus est maximale en hiver (en moyenne  $320 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) et minimale en été (en moyenne  $160 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Des variations d'un facteur 2 à 3 peuvent exister entre les concentrations de radionucléides naturels chez des échantillons d'une même espèce prélevés en des lieux différents ou à des époques différentes.

Les organismes marins concentrent le polonium 210 en quantités relativement importantes. Les concentrations en polonium 210 sont 50 000 fois supérieures à celles de l'eau de mer pour les crustacés, 10 000 fois pour les mollusques et 2000 fois pour les poissons. Ce radionucléide étant un émetteur alpha, il contribue majoritairement à la dose d'irradiation naturelle du fait de la consommation de produits de la mer. Les parties consommables des moules peuvent contenir 10 à  $120 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  de poids frais de polonium 210. La consommation de 10 kg par an de mollusques et crustacés peut ainsi conduire à une dose annuelle intégrée supérieure à 3 mSv dans les régions proches d'usines productrices de phosphates riches en polonium 210, effectuant des rejets en mer.

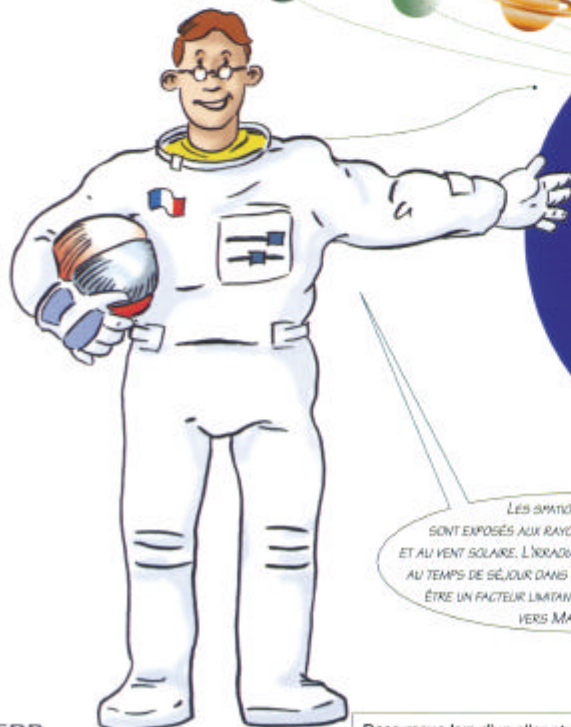
LES RAYONS COSMIQUES

# VOYAGE GALACTIQUE



LES RAYONS COSMIQUES, QUI SILLONNENT L'ESPACE À DES VITESSES VOISINES DE CELLE DE LA LUMIÈRE SONT TRÈS ÉNERGÉTIQUES. LA GRANDE MAJORITÉ D'ENTRE EUX PROVIENT DES CONFINS DE NOTRE GALAXIE MAIS AUSSI D'AUTRES GALAXIES.

LE SOLEIL ÉMET AUSSI DES PARTICULES QUI BALAYENT TOUT L'ESPACE INTERPLANÉTAIRE. CE "VENT SOLAIRE", INTENSE LORS DES ÉRUPTIONS, SE DISTINGUE DES AUTRES RAYONS COSMIQUES CAR SES PARTICULES ONT UNE ÉNERGIE PLUS FAIBLE.



LES SPATONAUTES SONT EXPOSÉS AUX RAYONS COSMIQUES ET AU VENT SOLAIRE. L'IRRADIATION EST PROPORTIONNELLE AU TEMPS DE SÉJOUR DANS L'ESPACE. ELLE POURRAIT ÊTRE UN FACTEUR LIMITANT POUR LES VOLS HAUTES VERS MARS.



Dose reçue lors d'un aller et retour vers Mars d'une durée de 2 ans et sans éruption solaire majeure au moins 2 000 mSv

## DANS L'ESPACE INTERSTELLAIRE

**E**n 1900, Charles T.R. Wilson, météorologiste britannique, étudiait avec d'autres physiciens les phénomènes électriques et ioniques existant dans l'atmosphère, comme la foudre. Son électromètre enregistrait en permanence un "bruit de fond" sous la forme d'un très faible courant d'ionisation qu'il était impossible de supprimer, même en protégeant l'appareil. Comme Pierre et Marie Curie venaient de découvrir que le minerai d'uranium comportait de nombreux radionucléides émetteurs de rayonnements, les physiciens pensèrent que les rayonnements parasites venaient des matériaux terrestres environnants. Pour s'en affranchir, ils firent des expériences en mer ... qui montrèrent que le phénomène subsistait. En 1912, le physicien autrichien Victor Hess effectua des mesures en ballon et constata qu'avec l'altitude, non seulement le phénomène ne s'atténuait pas, mais il s'amplifiait. Il fallait bien admettre que ces rayonnements n'étaient pas d'origine terrestre, mais extra-terrestre. Ces conclusions furent confirmées dans les années suivantes et l'existence de rayons cosmiques fut définitivement admise en 1926.

**L**es rayons cosmiques sont des flux de particules qui sillonnent l'espace de notre galaxie dans toutes les directions. Ils sont composés essentiellement d'ions, c'est à dire d'atomes dépourvus de leurs électrons périphériques à cause de leur vitesse extrêmement élevée : noyaux d'hydrogène (85%), noyaux d'hélium (12,5%), électrons (1,5%) et noyaux plus lourds (1%) allant jusqu'au fer.

**U**ne première composante stable est due au rayonnement venant de notre galaxie et d'autres galaxies. Elle est constituée d'ions extrêmement énergétiques :  $10^{10}$  eV en moyenne. Certains protons atteignent  $10^{20}$  eV, une énergie bien supérieure à celle produite aujourd'hui dans les accélérateurs de particules ! (au maximum quelque  $10^{12}$  eV). Ces particules sont les uniques échantillons de matière qui nous parviennent d'au-delà du système solaire.

**L'**autre composante, en provenance du soleil, le "vent solaire", fluctue avec les éruptions solaires. Celles-ci donnent naissance à de grandes quantités de particules, surtout des protons. L'énergie moyenne des particules du vent solaire est plus faible que celle de la composante galactique.

**D**ans le futur, les rayonnements cosmiques vont poser des problèmes d'exposition aux spationautes des vols interplanétaires habités car les parois des vaisseaux spatiaux ont une faible efficacité face aux particules d'énergie élevée, très pénétrantes. Pour un voyage aller et retour vers Mars, estimé à environ deux ans sans compter le séjour sur la planète, la dose reçue par un spationaute serait au moins de 2000 mSv, sans éruption solaire majeure pendant cette période. Ces estimations, qui comportent de grandes incertitudes, font actuellement l'objet de plusieurs programmes de recherche.

Symboles : électronvolt = eV, joule = J,  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

LES RAYONS COSMIQUES  
EN HAUTE ATMOSPHERE

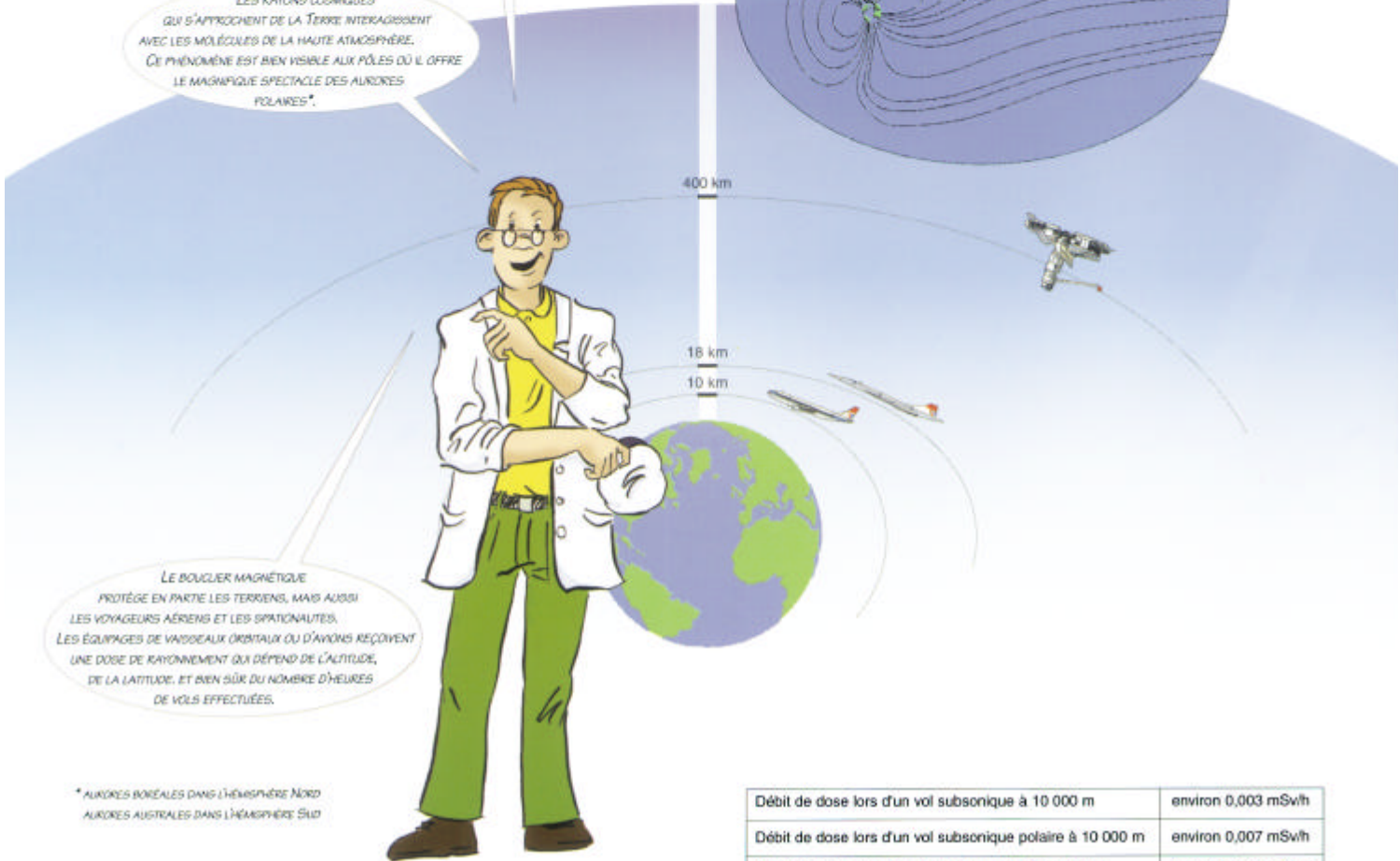
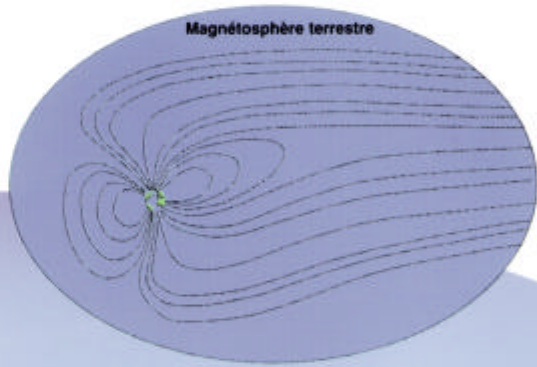
# FÉERIES CÉLESTES



... UNE SORTIE DE FLUORESCENCE  
DANS LA NUIT. JE TE RAMÈNERAI DES PHOTOS  
DÈS MON RETOUR POUR METTRE SUR LES MURS  
DE TA CHAMBRE...

LE CHAMP MAGNÉTIQUE  
TERRESTRE FORME, À DES MILLIERS  
DE KILOMÈTRES D'AUTITUDE, UN "BOULIER"  
QUI REPOUSSE CERTAINS RAYONS COSMIQUES  
OU LES DÉVIE, PRINCIPALEMENT  
VERS LES PÔLES.

LES RAYONS COSMIQUES  
QUI S'APPROCHENT DE LA TERRE INTERAGISSENT  
AVEC LES MOLÉCULES DE LA HAUTE ATMOSPHERE.  
CE PHÉNOMÈNE EST BIEN VISIBLE AUX PÔLES OÙ IL OFFRE  
LE MAGNIFIQUE SPECTACLE DES AURORES  
POLAIRES\*.



LE BOULIER MAGNÉTIQUE  
PROTÈGE EN PARTE LES TERRESTRES, MAIS AUSSI  
LES VOYAGEURS AÉRIENS ET LES SPATONAUTES.  
LES ÉQUIPAGES DE VASSEAUX ORBITAUX OU D'AVIONS REÇOIVENT  
UNE DOSE DE RAYONNEMENT QUI DÉPEND DE L'ALTITUDE,  
DE LA LATITUDE, ET BIEN SÛR DU NOMBRE D'HEURES  
DE VOLS EFFECTUÉS.

\* AURORES BORÉALES DANS L'HÉMISPHÈRE NORD  
AURORES AUSTRALES DANS L'HÉMISPHÈRE SUD

Débit de dose lors d'un vol subsonique à 10 000 m	environ 0,003 mSv/h
Débit de dose lors d'un vol subsonique polaire à 10 000 m	environ 0,007 mSv/h
Débit de dose lors d'un vol supersonique à 18 000 m	environ 0,012 mSv/h
Débit de dose à bord de la station russe MIR à 400 km	environ 0,030 mSv/h



## ET LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

**L**es particules chargées qui composent le rayonnement cosmique sont sans cesse déviées par les champs magnétiques interstellaires. Celles qui arrivent vers la Terre interagissent avec le champ magnétique terrestre pour former une magnétosphère bien caractéristique. Pour des altitudes inférieures à environ 10 rayons terrestres (65 000 km), les lignes de champs enveloppent la terre d'un pôle à l'autre. Mais le vent solaire exerce une telle pression sur le champ magnétique qu'il génère du côté opposé au soleil une queue magnétosphérique qui s'étire jusqu'à plusieurs milliers de rayons terrestres. (Il faut noter que des planètes comme Mercure, Jupiter, Saturne, Uranus ou Neptune ont aussi leur magnétosphère).

**A** l'intérieur de la magnétosphère terrestre, il existe des zones de dépression du champ magnétique formant des ceintures dans lesquelles sont piégées les particules chargées : on les appelle "ceintures de Van Allen", du nom du chercheur qui les a découvertes en 1958. Elles sont situées entre 3000 et 4000 kilomètres d'altitude pour la ceinture interne composée d'électrons et 20 000 kilomètres pour la ceinture externe composée de protons.

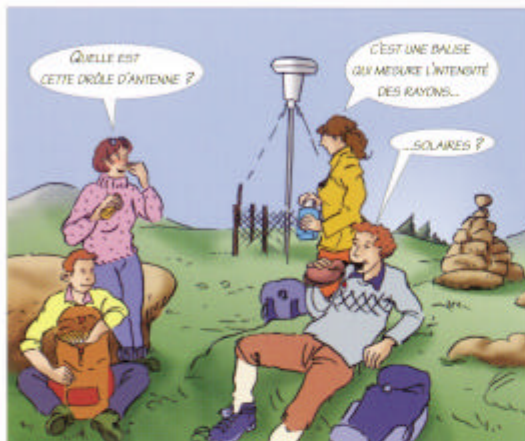
**L**a magnétosphère forme un "bouclier magnétique" qui protège la Terre des rayons cosmiques. Leur entrée est tout de même facilitée aux pôles où les particules suivent les lignes de force et interagissent avec les molécules de la haute atmosphère pour induire les phénomènes d'aurores boréales, à plus de 80 km d'altitude.

**L**a magnétosphère protège donc partiellement les terriens ... mais aussi les cosmonautes, qui effectuent leurs vols orbitaux à moins de 500 kilomètres d'altitude. On a mesuré à bord de la station russe MIR un débit de dose moyen de 0,03 à 0,04 mSv/h. La station est particulièrement exposée lorsqu'elle traverse "l'anomalie de l'Atlantique sud" (qui correspond aux couches basses des ceintures de Van Allen) où le débit de dose peut atteindre une valeur cinquante fois supérieure (1,5 à 2 mSv/h). Compte tenu du type de particules et des variations liées aux éruptions solaires, on estime que le personnel à bord de stations orbitales reçoit en moyenne une dose journalière de 0,7 à 1 mSv. Dans les futurs vols interplanétaires, les spatonautes devront se protéger au moment de traverser les ceintures de Van Allen, où le rayonnement cosmique est très intense.

**A** l'altitude de croisière des avions long-courriers, entre 9 000 et 11 000 m, le débit moyen de dose est de 0,002 à 0,003 mSv/h sur le vol Paris-Buenos-Aires et est minimum au passage de l'équateur. Lors d'un vol polaire Paris-Tokyo le débit de dose est deux à trois fois supérieur à grande latitude ( $> 60^\circ$ ). A l'altitude de croisière du supersonique Concorde (18 000 m), le débit de dose au cours du vol Paris-New York est environ deux fois plus important que pour un vol subsonique. La dose annuelle atteint en moyenne 4 à 5 mSv par an pour le personnel navigant et certains passagers prenant fréquemment l'avion. Elle peut atteindre 6 à 7 mSv pour certains équipages pratiquant fréquemment des vols polaires. La moitié de la dose reçue à bord d'avions long courrier est imputable aux neutrons.

LES RAYONS COSMIQUES  
À HAUTE ET BASSE ALTITUDE

À L'ASSAUT  
DES  
CÎMES



LORS DE LEURS COLLISIONS AVEC LES MOLÉCULES DE L'ATMOSPHÈRE, LES RAYONS COSMIQUES PRODUISENT UN GRAND NOMBRE D'ATOMES RADIOACTIFS TELS QUE LE CARBONE 14 ET LE TITANIUM. LE PLUS ABONDANT, LE CARBONE 14 SE MÉLANGE AU GAZ CARBONIQUE DE L'AIR (CO<sub>2</sub>). LE TITANIUM SE DISSOUT DANS LES EAUX CONTINENTALES ET LES OcéANS.

LES RAYONS COSMIQUES SE DÉGRADENT AU FUR ET À MESURE QU'ILS PÉNÈTRENT DANS LES COUCHES DENSES. L'ATMOSPHÈRE JOUE LE RÔLE D'UN ÉCRAN DONT L'EFFICACITÉ AUGMENTE AVEC L'ÉPAISSEUR : EN PASSANT DE 1 500 M À 2 000 M, L'INTENSITÉ DES RAYONS COSMIQUES EST DIVISÉE PAR 2. ON ESTIME QUE SEULEMENT 0,05 % D'ENTRE EUX ARRIVENT AU NIVEAU DE LA MER.

SI LE BOUCLIER MAGNÉTIQUE ET L'ATMOSPHÈRE NE JOUAIENT PAS LEUR RÔLE PROTECTEUR, LE DÉBIT DE DOSE AU NIVEAU DE LA MER SERAIT DE 1 000 mSv/AN.

Débit de dose au niveau de la mer	environ 0,3 mSv/an
Débit de dose à 1 500 mètres	environ 0,6 mSv/an
Débit de dose à 3 000 mètres	environ 1,2 mSv/an

Venant de l'espace, le rayonnement cosmique "primaire" interagit avec les atomes de l'atmosphère et produit un rayonnement cosmique "secondaire" composé d'électrons, de photons, de neutrons et de mésons. L'atmosphère constitue un écran efficace puisque seulement 0,05 % des particules arrivent au niveau de la mer (où le rayonnement cosmique est composé à 80% de mésons et à 20% d'électrons).

Il faut donc monter en altitude pour rencontrer un rayonnement cosmique plus riche et plus intense. C'est ce qu'avaient compris les physiciens comme Pierre Auger ou Louis le Prince Ringuet, qui installèrent dans les années 1930 des détecteurs au sommet du pic du Midi (2885 m) pour observer des particules élémentaires naturelles bien avant que les accélérateurs ne les recréent artificiellement.

Une expérience spectaculaire de détection et d'observation du rayonnement cosmique peut être facilement réalisée grâce à un appareil mis au point en 1911 et appelé "chambre à brouillard" ou "chambre de Wilson", du nom de son inventeur. Une enceinte fermée contient un mélange de gaz et de vapeur à la limite de la condensation (de l'air et de la vapeur d'eau par exemple). Les rayons cosmiques qui traversent l'enceinte ionisent sur leur passage les atomes du gaz. Comme la vapeur se condense en très fines gouttelettes et que ces gouttelettes ont tendance à s'accrocher aux atomes ionisés, on observe des traînées qui matérialisent la trajectoire des rayons cosmiques, un peu comme une traînée de vapeur d'eau matérialise dans le ciel la trajectoire d'un avion.

L'interaction du rayonnement cosmique avec les atomes présents dans l'atmosphère produit non seulement des particules élémentaires mais aussi une série de radionucléides dits "cosmogéniques" tels le carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ), tritium ( $^3\text{H}$ ), béryllium 7 ( $^7\text{Be}$ ), sodium 22 ( $^{22}\text{Na}$ ), pour ne citer que les plus importants au niveau de l'irradiation des populations. Nés dans la haute atmosphère, ils parviennent au niveau du sol en quelques semaines ou quelques années, ce qui conduit à une bonne homogénéisation sur l'ensemble du globe.

Le carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ) provient de l'interaction des neutrons cosmiques lents avec l'azote de l'air ( $^{14}\text{N}$  stable). Il s'oxyde en  $^{14}\text{CO}_2$ , se mélange au gaz carbonique de l'air et s'intègre au cycle biologique normal.

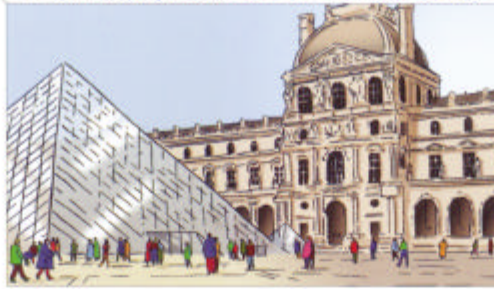
Le tritium est un isotope de l'hydrogène ( $^3\text{H}$ ). Il résulte de l'interaction des rayons cosmiques avec les noyaux d'argon, d'azote et d'oxygène. Il se combine avec l'oxygène et l'hydrogène pour former de l'eau "tritiée" (molécule THO, T désignant le tritium). L'eau tritiée participe au cycle de l'eau. Sa concentration est de  $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  dans les eaux continentales et  $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  dans les océans.

Symboles : carbone = C, hydrogène = H (tritium =  $^3\text{H}$  ou T), béryllium = Be, sodium = Na

# DATATION

## AU FIL DU TEMPS

MA MÈRE TRAVAILLE AU DÉPARTEMENT "ÉGYPTOLOGIE" DU MUSÉE DU LOUVRE. ELLE A INVITÉ MA CLASSE À DÉCOUVRIR UNE NOUVELLE PERSONNAGE : UNE MÈRE.



LE CARBONE 14 EST FABRIQUÉ EN HAUTE ATMOSPHÈRE PAR INTERACTION DES RAYONS COSMIQUES AVEC L'AZOTE DE L'AIR. IL S'OXYDE RAPIDEMENT POUR DONNER DU GAZ CARBONIQUE QUI SE MÉLANGE AU GAZ CARBONIQUE DE L'AIR.



<sup>14</sup>C = carbone 14  
<sup>14</sup>N = azote 14

DE SON VIVANT, CET ÉGYPTIEN ASSIMILAIT DU CARBONE DONT L'ACTIVITÉ NATURELLE ÉTAIT DE 227 Bq/kg (CETTE VALEUR EST LA MÊME POUR TOUTS LES ORGANISMES VIVANTS ET QUASIMENT CONSTANTE DANS LE TEMPS).



À SA MORT, SON STOCK DE CARBONE 14 COMMENÇA À DÉCROÎTRE EN SE TRANSFORMANT EN AZOTE 14.

AUJOURD'HUI, ON MESURE L'ACTIVITÉ RÉSIDUELLE DU CARBONE SUR UN MINUSCULE FRAGMENT D'OS PRÉLEVÉ. COMME ON CONNAÎT LA LŒ DE DÉCROISSANCE DU CARBONE 14, ON EN DÉDUIT SON ÂGE À 2000 ANS PRÈS.

Radionucléides utilisés	Application	Datation jusqu'à...
uranium 238 - plomb 206	Géologie	des milliards d'années
potassium 40 - argon 40	Premiers hommes	des millions d'années
carbone 14	Égyptien, préhistoire	50 000 ans

Les isotopes radioactifs se désintègrent au cours du temps. Dans cette transformation, un isotope radioactif père donne naissance à un isotope fils. La quantité d'isotope père qui disparaît ne dépend que du temps, selon une loi exponentielle caractérisée par la période du père. Elle est indépendante de la température, de la pression, ou du milieu environnant. En mesurant la quantité d'isotope père qui subsiste (ou la quantité d'isotope fils créé), on calcule le temps écoulé depuis le début du phénomène.

L'idée d'utiliser la désintégration d'un radionucléide comme chronomètre des temps (historiques, préhistoriques et géologiques) est née dès le début du siècle, quelques années après la découverte de la radioactivité naturelle, mais la "radiochronologie" n'a vraiment pris son essor qu'à partir de 1945.

La méthode la plus connue est celle du carbone 14. Il est constamment régénéré dans l'atmosphère par interaction des neutrons cosmiques lents avec l'azote 14. Transformé en  $^{14}\text{CO}_2$ , il se mélange au gaz carbonique de l'air  $^{12}\text{CO}_2$  et s'intègre au cycle biologique normal, le rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  étant sensiblement constant. Ainsi, tout être vivant du règne animal ou végétal renferme du carbone dont la radioactivité, liée à la présence du carbone 14, est de 228 becquerels par kilogramme de carbone.

À sa mort, les échanges avec l'atmosphère s'interrompent et la radioactivité du carbone commence à décroître de façon exponentielle (après une période, soit 5730 ans, on ne comptera plus que 114 becquerels par kilogramme dans le même kilogramme de carbone). On prélève un échantillon (d'os, de charbon de bois, de cuir, de coquillage ...) et on mesure la radioactivité résiduelle du carbone. Compte tenu de la taille des échantillons (pour dater les peintures rupestres, on prélève une infime quantité de charbon de bois utilisé pour le tracé des dessins), la mesure est très difficile et nécessite de grandes précautions (comme l'isolation des appareils vis à vis des rayons cosmiques). Mais depuis 10 ans, les techniques se sont affinées : on ne compte plus les désintégrations, mais les atomes de  $^{14}\text{C}$  eux-mêmes, grâce à un spectromètre de masse couplé à un accélérateur.

En fait, les datations obtenues doivent être corrigées car le rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  n'a pas été constant au cours des temps : l'intensité du champ magnétique terrestre fluctue à l'échelle des temps géologiques, laissant pénétrer plus ou moins de rayons cosmiques dans l'atmosphère et faisant varier la production de carbone 14. Les essais atomiques militaires dans l'atmosphère (de 1960 à 1980) ont produit d'importantes quantités supplémentaires de  $^{14}\text{C}$  (augmentation du rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ). La combustion massive de houille et d'hydrocarbures depuis plus d'un siècle a enrichi l'atmosphère en  $^{12}\text{CO}_2$  (diminution du rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ). Les corrections ne sont pas négligeables : les peintures rupestres de Lascaux, par exemple, datées initialement de 17 000 ans, ont été réévaluées à 19 000 ans.

La méthode de datation au carbone 14 ne s'applique qu'à des matières organiques et ne peut donner des âges supérieurs à 50 000 ans. Pour déterminer l'âge d'un australopitèque vieux de millions d'années, ou dater un événement géologique vieux de centaines de millions d'années, on fait appel aux radionucléides primordiaux :

Méthode "potassium-argon" :  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  (période 1,3 milliard d'années)

Méthode "uranium-plomb" :  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$  (période 4,5 milliards d'années)

Méthode "rubidium-samarium" :  $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$  (période 47 milliards d'années)

RADIOACTIVITÉ  
DANS LE CORPS HUMAIN

BON  
APPÉTIT

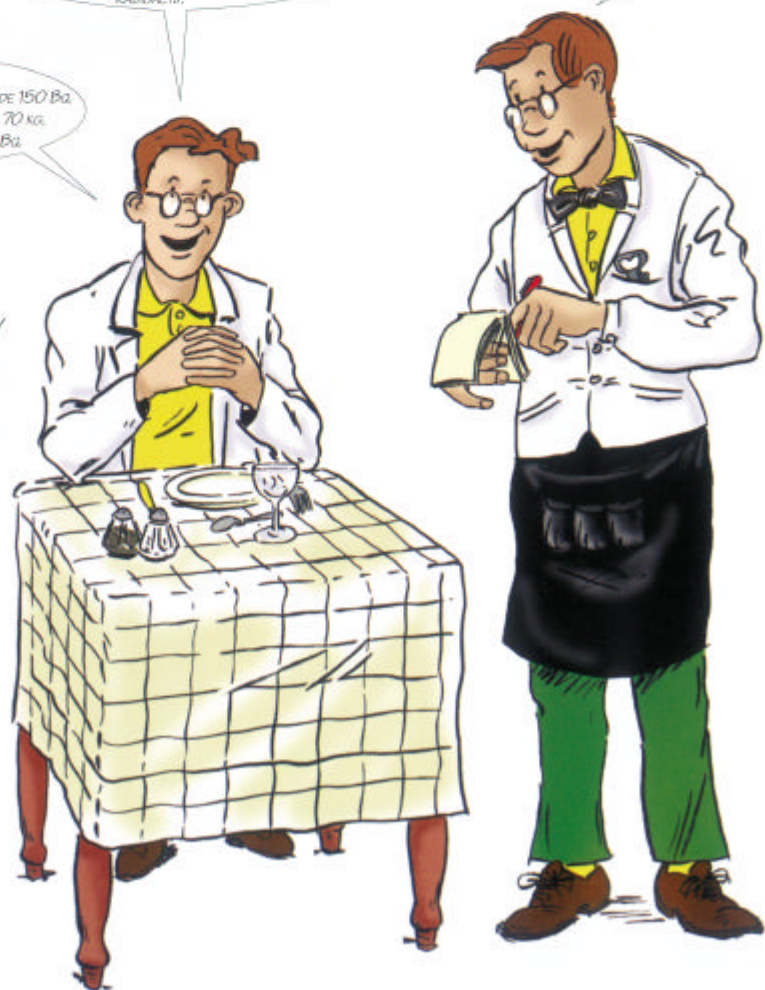


L'HOMME INGÈRE LES ÉLÉMENTS  
RADIOACTIFS PRÉSENTS DANS LES ALIMENTS : SURTOUT  
DU POTASSIUM 40 (100 Bq PAR JOUR) DANS LE SEL DE CUISINE,  
LE LAIT, LES FRUITS, ET DU CARBONE 14 (80 Bq PAR JOUR)  
DANS LES VÉGÉTAUX. IL EST DONC NATURELLEMENT  
RADIOACTIF.

ET POUR MONSIEUR,  
CE SERA LE MENU À 100 OU 200  
BECCQUERELS ?

NOUS ABSORBONS ET  
ÉLIMINONS QUOTIDIENNEMENT DE L'ORDRE DE 150 Bq.  
AU TOTAL, LA RADIOACTIVITÉ D'UN HOMME DE 70 KG.  
COMME MAX. EST D'ENVIRON 8 500 Bq.

CETTE VALEUR DÉPEND-ELLE  
DES HABITUDES ALIMENTAIRES ? PRATIQUEMENT PAS !  
CAR LA CONCENTRATION DU POTASSIUM (QUA CONTRIBUE  
POUR PLUS DE 50 % À LA RADIOACTIVITÉ) EST CONSTATE  
DANS LE CORPS HUMAIN ET INDÉPENDANTE DES  
QUANTITÉS INGESTES.



Homme 120 Bq/kg (potassium 40, carbone 14)

L'homme incorpore par ingestion les radionucléides primordiaux ou cosmogéniques qui sont transférés dans les chaînes alimentaires. Les quantités annuelles des principaux radionucléides ingérés sont environ les suivantes (en  $\text{Bq}\cdot\text{an}^{-1}$ ) :

Radionucléides primordiaux :

potassium 40	36 000
rubidium 87	800
polonium 210	40 (1 400 pour les populations arctiques)

Radionucléides cosmogéniques :

carbone 14	20 000
béryllium 7	1 000
tritium	500
sodium 22	50

Le potassium 40, le carbone 14 et le tritium sont présents de façon universelle dans tous les aliments. Le potassium (dont le potassium 40 est un isotope) est un constituant normal de la matière végétale ou animale. Le carbone (dont le carbone 14 est un isotope) est le constituant de base de la matière organique. Le tritium, isotope de l'hydrogène, est présent dans l'eau sous forme d'eau tritiée.

Le béryllium 7, produit dans l'atmosphère, se dépose par l'eau de pluie sur les végétaux à grande surface foliaire. Le polonium 210 est un descendant du gaz radon. Comme il est présent aussi bien dans le sol que dans l'air, il contamine les végétaux par les racines et les feuilles.

L'homme est donc radioactif. La radioactivité d'un homme de 70 kg est d'environ 8 600 Bq, répartie de la façon suivante, pour les radionucléides principaux :

potassium 40	4 400 Bq
carbone 14	3 700 Bq
rubidium 87	450 Bq
tritium	40 Bq

La radioactivité du corps humain peut varier en fonction de la région et du régime alimentaire. En particulier, le radium 226 (dans certaines eaux, dans les noix du Brésil, dans les fruits et légumes de la région du Kerala en Inde...) ou le polonium 210 (dans la viande de renne ou de caribou...) peut apporter une contribution de quelques dizaines de becquerels supplémentaires.

Mais, fait remarquable, la part prépondérante due au potassium 40 est la même pour tous. Le potassium, élément essentiel à la vie, est sous contrôle homéostatique dans le corps humain, ce qui signifie que sa concentration dans les organes et tissus est constante et indépendante de la quantité incorporée : 2 g de potassium par kg corporel, ce qui correspond à une radioactivité en potassium 40 de l'ordre de  $60 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

# EXPOSITIONS INDIVIDUELLES

EN FRANCE, LA DOSE INDIVIDUELLE MOYENNE DUE AUX IRRADIATIONS D'ORIGINE NATURELLE EST DE 2,4 mSv PAR AN, MAIS



... ELLE VARIE BEAUCOUP À L'INTÉRIEUR D'UNE RÉGION, ET D'UNE RÉGION À L'AUTRE. CERTAINES ACTIVITÉS PROFESSIONNELLES CONDUISSENT AINSI À DES IRRADIATIONS NATURELLES PLUS ÉLEVÉES.

Rayonnement Cosmique

Inhalation de radon

Ingestion de radionucléides



Rayonnement tellurique

