

Ministère de l'Économie,
des Finances et de l'Industrie



Secrétariat
d'État à l'Industrie

Eau Minérale et Radioactivité

Note technique n° 15

Juillet 2000

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	1
2. RAPPEL DES NOTIONS SUR LA RADIOACTIVITÉ.....	1
2.1 Caractérisation de la radioactivité	2
2.2 Effets des rayonnements sur la matière	3
2.3 Radioactivité dans la nature	4
2.4 Exposition des organismes vivants aux rayonnements radioactifs	5
2.5 Radioactivité des eaux minérales.....	7
3. RÉGLEMENTATION ET TEXTES DE RÉFÉRENCE	9
3.1 Réglementation applicable aux eaux minérales	9
3.2 Réglementation applicable aux eaux destinées à la consommation humaine	11
3.3 Recommandations OMS	11
4. CONCLUSION	12
BIBLIOGRAPHIE	13

Tableaux :

1. Termes et unités radiologiques	14
2. Liste des radionucléides naturels	15

Annexes :

1. Exemples de calcul de l'activité radioactive et des doses absorbées	16
2. Famille d'Uranium 235	19
3. Famille d'Uranium 238	20
4. Famille de Thorium 232.....	21
5. Extrait des recommandations de l'OMS.....	22

RÉSUMÉ

Les analyses de radioactivité font partie des éléments constitutifs des dossiers de demande d'autorisation des eaux minérales.

La présente note technique a pour objet de permettre aux services en charge de l'instruction de ces dossiers de disposer d'informations utiles pour une lecture éclairée des résultats d'analyse de la radioactivité.

Les textes de référence, actuellement disponibles au niveau mondial, sont les recommandations de l'OMS en matière d'eau de boisson (Directives de qualité pour l'eau de boisson 1994).

Au niveau européen les limites admissibles en terme de radioactivité pour les eaux destinées à la consommation humaine sont définies par la directive n° 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998.

Au niveau français, la transcription en droit national de la directive européenne n° 98/83 est en cours d'élaboration.

On notera que les eaux minérales n'entrent pas dans le champ d'application de ces textes. Cependant, en l'absence de texte spécifique, les recommandations de l'OMS peuvent servir de référence, notamment dans le domaine des eaux conditionnées.

1. INTRODUCTION

Si émettre un avis sur la radioactivité d'une eau minérale relève de l'aspect sanitaire (domaine de spécialistes), il n'en demeure pas moins que les bulletins d'analyse de radioactivité font partie des dossiers de demande d'autorisation d'exploiter une eau minérale dont les DRIRE assurent l'instruction.

La présente note technique a pour objet de présenter les notions essentielles de la radioactivité de façon à permettre au lecteur de disposer d'éléments d'information pour comprendre les résultats d'analyses.

Cette note a été établie avec l'assistance de l'OPRI ⁽¹⁾ rattaché au ministère chargé de la santé comme laboratoire officiel pour la mesure de la radioactivité dans l'environnement et les denrées destinées à la consommation. La liste des laboratoires ayant obtenu le certificat de qualification pour la mesure de certains radionucléides a été établie par le ministère chargé de la santé (arrêté du 22 mai 1998).

NOTA : *Les éléments pris en compte quant aux aspects réglementaires ne concernent pas la protection des travailleurs contre les rayonnements ionisants dans les usines ou établissements thermaux concernés.*

2. RAPPEL DES NOTIONS SUR LA RADIOACTIVITÉ

La radioactivité est la transformation aléatoire spontanée d'un noyau atomique au cours de laquelle ce dernier émet un rayonnement. Il existe plusieurs types de transformations et de rayonnements. Les plus répandus dans la nature sont les rayonnements α , β et γ .

- Le rayonnement α est la conséquence de la désintégration (partition) d'un noyau atomique avec expulsion (émission) d'un noyau d'hélium (particule α) comprenant deux protons (charges électriques élémentaires positives) et deux neutrons. Les particules α sont lourdes et généralement très énergétiques (entre 4 et 10 MeV ; $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule). En traversant la matière (air, eau, solide, tissu vivant) ces particules restituent leur énergie en provoquant une ionisation. Leur trajet dans la matière est relativement court : quelques centimètres dans l'air, quelques micromètres dans l'eau. Les particules α sont arrêtées par une très mince feuille de papier.
- Le rayonnement β négatif est une émission d'un électron (particule β négative) à l'occasion de la transformation d'un neutron en proton (il existe également des émissions de particules β positives, appelées "positons" ou encore "électrons positifs", quand des protons se transforment en neutrons). Les particules β négatives sont beaucoup plus légères et moins énergétiques (entre 0,02 à 3 MeV) que les particules α . Elles restituent leur énergie en provoquant une ionisation, sur plusieurs mètres dans l'air ou plusieurs millimètres dans l'eau ; elles sont arrêtées par une plaque de verre ou une feuille d'aluminium.

¹ OPRI = Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants

- Le rayonnement γ est une émission de photons analogues à ceux de la lumière (rayonnement électromagnétique) qui se produit presque toujours au moment d'une désintégration α ou β : les noyaux résultant de ces désintégrations se trouvent dans un état "excité" et ils se "désexcitent" (en revenant à un état fondamental) par émission de rayons électromagnétiques (longueur d'onde des rayons γ : 10^{-10} à 10^{-12} m ; lumière visible : environ 10^{-6} m ; rayons X : 10^{-9} à 10^{-10} m) ; les rayons γ ont une énergie environ 10^5 fois plus forte que la lumière visible et sont très pénétrants ; le rayonnement γ ne peut être atténué ou arrêté que par des épaisseurs significatives de plomb ou de béton.

2.1 CARACTÉRISATION DE LA RADIOACTIVITÉ

Activité d'un élément radioactif

L'activité A d'une substance radioactive (radioélément ou isotope radioactif) est le nombre de désintégrations par unité de temps. Elle est exprimée en "becquerel" (Bq), un Bq correspondant à une désintégration par seconde. Elle dépend :

- de la quantité de substance radioactive prise en considération (ou plus exactement le nombre N d'atomes radioactifs pris en considération à l'instant donné) ;
- de la constante radioactive λ , cette constante étant une caractéristique de chaque élément radioactif :

$$A = \lambda \cdot N$$

L'activité A d'une substance radioactive décroît exponentiellement suivant la loi de décroissance :

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ (} A_0 \text{ étant l'activité à l'instant } t_0 \text{)}$$

On peut écrire aussi $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ (N_0 étant le nombre d'atomes radioactifs à l'instant t_0 et N, le nombre d'atomes radioactifs non désintégrés, après un temps t).

Période d'un radioélément T

La période T d'un radioélément est le temps après lequel la moitié des atomes initialement présents ont disparu par désintégration.

Après un temps T, N n'est plus que $\frac{N_0}{2}$

On en déduit la relation :

$$T = \frac{0,693}{\lambda}$$

La période T , comme la constante radioactive λ , est une caractéristique de chaque élément radioactif.

Les périodes radioactives des éléments radioactifs naturels ont une gamme très étendue. Elles s'échelonnent entre quelques milliards d'années et une fraction de seconde. Par exemple :

- uranium 238 (${}^{238}_{92}\text{U}$), $T = 4,5 \cdot 10^9$ années
- radium 226 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$), $T = 1\,617$ années
- radon 222 (${}^{222}_{86}\text{Rn}$), $T = 3,8$ jours
- polonium 214 (${}^{214}_{84}\text{Po}$), $T = 1,6 \cdot 10^{-4}$ seconde

Énergie des particules et des photons γ

Les particules α et β émises à l'occasion des désintégrations des noyaux atomiques n'ont pas la même énergie. Celle-ci, exprimée en MeV ($1\text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13}\text{ J}$) dépend du noyau qui se désintègre. Les graphiques joints en annexe donnent les énergies des particules émises par les radionucléides des familles de l'uranium 238 (${}^{238}_{92}\text{U}$), du thorium 232 (${}^{232}_{90}\text{Th}$) et de l'uranium 235 (${}^{235}_{92}\text{U}$).

L'énergie des photons γ émis à l'occasion des désintégrations α et β des radionucléides naturels est généralement très faible comparativement à l'énergie de ces particules.

2.2 EFFETS DES RAYONNEMENTS SUR LA MATIÈRE

En traversant la matière, les rayonnements lui transmettent l'énergie dont ils sont porteurs et provoquent généralement une ionisation des atomes rencontrés. L'énergie transmise à l'unité de masse de matière est la "dose absorbée" dont l'unité de mesure est le Gray (Gy) ; le Gray étant l'énergie de 1 Joule dissipée dans 1 kg de matière : $1\text{ Gy} = 1\text{ J/kg}$. Une autre unité utilisée est le rad ($1\text{rd} = 10^{-2}\text{ Gy}$).

Si l'énergie des rayonnements est dissipée dans des tissus vivants, à forte dose, ces tissus peuvent être détruits par brûlures et entraîner la mort des organismes. A faible dose, les effets sont généralement imperceptibles, mais des cellules vivantes peuvent être endommagées et l'ADN peut subir des lésions. La nocivité des rayonnements ne dépend pas seulement de la quantité d'énergie dissipée par les rayonnements mais aussi des organes exposés et de la nature des rayonnements, les α étant beaucoup plus nocifs (plus ionisants) que les β et γ .

Ainsi, pour tenir compte des effets dommageables, on applique aux doses absorbées par les tissus vivants un coefficient appelé "facteur de qualité" ou "facteur de pondération radiologique" FQ, dépendant de la nature des rayonnements. Pour les rayonnements β et γ , le facteur de qualité $FQ = 1$; pour les rayons α , $FQ = 20$. Pour ne pas confondre les doses absorbées par les substances inertes (exprimées en Gray) avec les doses absorbées par les tissus vivants, auxquelles a été appliqué le facteur de qualité FQ, dans le dernier cas, on parle « d'équivalent de dose absorbée » et l'unité de mesure est le sievert (Sv).

Les différentes unités utilisées sont regroupées dans le tableau 1 ci-après (page 14). L'annexe 1 (page 16) comporte quelques exemples de calcul des activités et des doses absorbées.

2.3 RADIOACTIVITÉ DANS LA NATURE

La radioactivité de l'environnement ambiant est due essentiellement au rayonnement cosmique et aux radionucléides naturels de très longue période (de l'ordre de l'âge de la terre sinon ils auraient déjà disparu). Parmi ces derniers, les plus connus sont les deux familles de l'uranium ($^{238}_{92}\text{U}$ et $^{235}_{92}\text{U}$), la famille du thorium 232 ($^{232}_{90}\text{Th}$) (voir schémas annexes 2, 3, 4), ainsi que l'isotope 40 de potassium ($^{40}_{19}\text{K}$ de période $T = 1,27 \cdot 10^9$ années) sans descendant radioactif.

L'abondance de l'uranium naturel est de l'ordre de 1 à quelques mg/kg dans l'écorce terrestre (l'abondance du thorium est trois fois plus importante). Elle est généralement plus élevée dans les granites que dans les roches sédimentaires. A la concentration de 400 mg/kg, une roche est qualifiée de « minerai d'uranium » (cette notion est fortement liée aux critères économiques, les gisements exploitables ayant des teneurs qui varient de 0,04 % à 1,5 % ; à noter la teneur exceptionnelle de 14 % dans le gisement le plus riche connu jusqu'à présent, découvert dans la province de SASKATCHEWAN du grand nord canadien).

Dans certaines régions les eaux de surface peuvent atteindre des concentrations en uranium de 1 µg/l et les eaux souterraines (dont font partie les eaux minérales) peuvent dépasser 5 µg/l.

Le potassium 40 radioactif est présent dans le potassium naturel, dans la proportion de 0,01 %. L'abondance du potassium naturel dans l'écorce terrestre est de 23 g/kg (soit 2,3 mg/kg de potassium 40). Les aliments en contiennent 3 à 40 g/kg. Dans le corps humain, la régulation métabolique assure une concentration régulière d'environ 2 g/kg (soit 0,2 mg/kg de potassium 40).

En dehors de ces radionucléides de périodes très longues (les 2 familles d'uranium, de thorium et le potassium 40), il en existe de périodes encore plus longues (et de ce fait très faiblement actifs) : rubidium 87 ($T = 4,7 \cdot 10^{10}$ ans), lanthane 138 ($T = 1,3 \cdot 10^{11}$ ans), samarium 147 ($T = 1,1 \cdot 10^{11}$ ans), platine 190 ($T = 6,1 \cdot 10^{11}$ ans).

D'autres radionucléides naturels sont formés en permanence par interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère (et même avec le sol). Il s'agit notamment du carbone 14 ($^{14}_6\text{C}$) et du tritium (^3_1H). L'abondance moyenne du carbone 14 dans le carbone naturel est de l'ordre de 10^{-12} et celle du tritium dans l'hydrogène de l'ordre de 10^{-18} .

Il y a environ 50 radionucléides naturels (tableau 2) dont certains sont très éphémères comme par exemple l'astate 216 ($T = 0,3$ ms) ou les isotopes 215, 214 et 212 du polonium dont les périodes s'échelonnent entre 1,8 ms et 0,3 µs.

A côté de ces radionucléides naturels on dénombre plus de 1500 nucléides radioactifs artificiels qui sont élaborés dans des accélérateurs de particules, dans des réacteurs atomiques ou au cours des essais d'armes nucléaires. Le comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) a estimé que les sources naturelles contribuent pour plus de 98 % à la dose de rayonnements reçue par la population (à l'exclusion des irradiations médicales). A l'échelle mondiale, l'exposition moyenne de l'homme au rayonnement naturel est de l'ordre de 2,4 mSv/an.

2.4 EXPOSITION DES ORGANISMES VIVANTS AUX RAYONNEMENTS RADIOACTIFS

Les organismes vivants sont soumis à deux types d'exposition : externe et interne.

Exposition externe

Comme le nom l'indique, il s'agit de rayons qui pénètrent dans l'organisme en venant de l'extérieur. On distingue les rayonnements cosmiques, terrestres et ceux qui résultent des activités humaines.

- **Rayonnement cosmique** : les rayons cosmiques primaires (particules ionisées de très grande énergie) en provenance de l'espace interplanétaire, principalement du soleil, produisent par collision avec les noyaux de l'atmosphère des cascades de rayons cosmiques secondaires. Le flux et l'énergie des rayons cosmiques qui atteignent le sol, varient avec la latitude géomagnétique et l'altitude. Ainsi le corps humain reçoit en moyenne, au niveau de la mer, l'équivalent de dose de 0,35 mSv/an et 0,6 mSv/an à 1500 m d'altitude (au cours d'un vol Paris-New York, le corps humain reçoit l'équivalent de dose de 0,03 mSv).
- **Rayonnement terrestre** : il est dû à la présence dans le sol des radioéléments naturels : potassium 40 et les familles d'uranium et de thorium. Il faut noter que les particules α et β ne quittent pratiquement pas le sol (même les particules α et β qui résultent de la désintégration du radon et de ses descendants présents dans la couche d'air au dessus du sol, ont une très faible probabilité d'atteindre les tissus vivants puisqu'elles sont arrêtées soit par l'air soit par l'épiderme). Le rayonnement terrestre est donc essentiellement constitué de photons γ . En moyenne, l'être humain reçoit en provenance du sol l'équivalent de dose de 0,41 mSv/an, les écarts variant de 0,1 à 4 mSv/an, suivant la nature des terrains (sédimentaires ou granitiques). Par exemple un ouvrier mineur qui se trouve dans une galerie creusée dans du minerai à 0,1 % d'uranium, reçoit l'équivalent de dose de l'ordre de 0,005 mSv/h de rayonnement γ .
- **Rayonnements résultant des activités humaines** : écrans de télévision, radiographies médicales ou radiothérapie (à l'occasion d'une radiographie pulmonaire, le corps humain reçoit l'équivalent de dose d'environ 1 mSv), sondes radioactives et appareils divers utilisés dans l'industrie. On estime qu'en moyenne, les êtres vivants reçoivent l'équivalent de dose d'environ 1 à 1,2 mSv/an, provenant du rayonnement résultant des activités humaines.

Exposition interne

L'exposition interne résulte de la désintégration des radioéléments présents dans l'organisme humain : potassium 40, carbone 14 ainsi que les descendants des familles d'uranium et de thorium.

Les deux premiers (potassium 40 et carbone 14) sont de loin les plus abondants (environ 50 Bq/kg chacun), mais fort heureusement l'énergie des particules β émises à l'occasion de leur désintégration, est relativement faible (respectivement 1,32 Mev et 0,165 Mev) ce qui donne des équivalents de doses absorbées de 0,29 mSv/an et 0,04 mSv/an pour chacun des éléments.

Tous ces radioéléments présents dans le corps humain délivrent un équivalent de dose de l'ordre de 1, 65 mSv/an. Ils pénètrent dans l'organisme soit par ingestion (boisson, nourriture) soit par inhalation.

- **Ingestion** : Les radioéléments naturels présents dans le sol se retrouvent fatalement dans les eaux ainsi que dans la chaîne alimentaire. Par exemple dans certaines eaux de surface, les teneurs en uranium peuvent atteindre 1 µg/l (25 mBq/l). Dans les eaux souterraines les concentrations sont d'environ 0,1 à 5 µg/l en uranium naturel (2,5 à 125 mBq/l), 0,81 à 27 pg/l en radium 226 (30 à 1000 mBq/l). Bien entendu, les autres descendants (surtout les descendants à vie longue) sont également en présence mais en quantité infinitésimale. Le thorium est relativement peu soluble dans les eaux et sa concentration dépasse rarement 1 µ/l (4 mBq/l). Le radon dont la concentration dans les eaux souterraines (ainsi que dans les eaux minérales) peut être assez élevée, s'échappe de l'eau dès que celle-ci est mise à l'air libre. Sa libération est également accélérée par les différentes manipulations (transvasement, agitations...) auxquelles est soumise l'eau avant d'être consommée. Par ailleurs la période radioactive du radon étant assez faible (54,5 s pour l'isotope 220 est 3,8 j pour le 222) sa présence dans l'eau au moment de son ingestion, est généralement faible.
- **Inhalation** : Les radioéléments inhalés sont principalement les isotopes de radon, leurs descendants en suspension dans l'air sous forme d'aérosols et accessoirement, les poussières susceptibles de renfermer des traces d'uranium et de thorium.

Le radon naturel (constitué de 3 isotopes 219, 220, 222 qui font partie respectivement des familles de l'uranium 235, du thorium 232 et de l'uranium 238) est le seul élément radioactif naturel gazeux. Il fait partie des « gaz rares » (ou « gaz inertes ») dans le sens qu'il ne réagit pas chimiquement avec les autres corps ce qui lui confère une grande mobilité. Ainsi, les atomes de radon qui naissent de la désintégration directe du radium présent dans l'écorce terrestre, migrent librement vers la surface du sol par les interstices et les fissures (il se dissout également facilement dans les eaux souterraines).

Au cours de sa migration vers la surface, il s'accumule dans les cavités naturelles ainsi que dans les galeries et les caves des habitations. A l'approche de la surface, il diffuse plus ou moins abondamment dans l'air, selon les variations de la pression atmosphérique. Au dessus du sol, on le trouve à des concentrations de quelques Bq par m³. *Une campagne de mesures faite sur le territoire national a mis en évidence une concentration moyenne de 66 Bq/m³, avec des moyennes régionales pouvant dépasser 150 Bq/m³ dans les zones granitiques.*

L'isotope 222 est plus abondant que le 220. La présence de radon 219 est insignifiante pour deux motifs : sa période est très courte (4 secondes, contre 54 secondes pour le radon 220 et 3,8 jours pour le radon 222) et l'uranium 235 dont il est descendant, est également peu abondant. Le radon se désintègre en émettant des particules α (6,3 Mev pour le radon 220 et 5,5 Mev pour le radon 222) et en donnant naissance à des descendants, eux-mêmes radioactifs, dont les périodes sont très courtes (0,16 s pour le polonium 216, 0,3 ms pour l'astate 216, 3 mn pour le polonium 218, 1,3 s pour l'astate 218, 20 mn pour le bismuth 214, 0,16 ms pour le polonium 214).

Le radon ainsi que ses descendants présents dans l'air sous forme d'ions libres ou fixés sur des aérosols, sont inhalés par les êtres vivants. Le radon (gaz) est exhalé assez rapidement, donc le nombre d'atomes désintégrés pendant son séjour dans les poumons n'est pas très élevés. Par contre les descendants inhalés se fixent dans les poumons et en peu de temps ils émettent des particules α très énergétiques. Ainsi, bien que n'étant pas lui même très nocif, le radon est un indicateur du nombre de descendants émetteurs α présents dans l'air. Pour des raisons sanitaires, dans les habitations où la concentration en radon 222 dépasse 400 Bq/m³, des mesures correctives (amélioration de l'isolation, ventilation) sont recommandées.

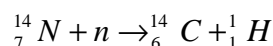
2.5 RADIOACTIVITÉ DES EAUX MINÉRALES

Les eaux minérales, comme toutes les eaux souterraines, contiennent des éléments radioactifs naturels dont les concentrations varient en fonction de paramètres tels que : nature géologique des terrains traversés, temps de contact (âge de l'eau), température, solubilité de l'élément concerné, etc... Les radioéléments les plus significatifs sont : le potassium 40, l'uranium naturel, le radium 226, le radon et accessoirement le thorium.

- **Potassium 40.** Il représente 0,01 % du potassium naturel, ce dernier étant assez abondant dans l'écorce terrestre (23 g/kg) ; les eaux minérales contiennent généralement entre 1 et 200 mg/l de potassium naturel, mais il existe quelques cas (pour les eaux très salées) avec des teneurs dépassant le 200 mg/l (à la teneur de 10 mg/l de potassium naturel correspond une activité β d'environ 260 mBq/l).
- **Uranium naturel.** Sa concentration dans les eaux minérales est généralement faible et ne dépasse pas 2 $\mu\text{g/l}$ (50 mBq/l de radioactivité α). Toutefois à l'émergence, certaines eaux minérales peuvent avoir des teneurs dépassant 10 $\mu\text{g/l}$.
- **Radium 226.** Ce radioélément, descendant de l'uranium 238, est émetteur α (à côté du radium 226 on rencontre également les deux autres descendants du thorium 232 : le radium 228 – émetteur β et le radium 224 émetteur α). Les teneurs en radium 226 dans les eaux minérales sont très faibles, de l'ordre du picogrammes ; sa concentration dans l'eau est indiquée en mBq/l. Les eaux minérales peuvent avoir des concentrations de quelques dizaines à quelques centaines de mBq/l.
- **Radon.** Il est généralement très abondant dans les eaux souterraines et aussi dans les eaux minérales. A l'émergence, il n'est pas rare de rencontrer des concentrations de quelques dizaines à plusieurs centaines (voire quelques milliers) de Bq/l. Cependant, comme il est indiqué au paragraphe précédent, le radon s'échappe de l'eau minérale dès que celle-ci est mise à l'air libre. Ce phénomène peut se traduire par des accumulations de radon dans les réservoirs de stockage ainsi que dans les galeries ou sont situées les captages des sources d'eau minérale.
- **Thorium.** Le thorium compte 6 isotopes naturels, le plus abondant étant l'isotope 232 suivi des isotopes 228 et 230. La solubilité du thorium dans les eaux souterraines est très faible et dépasse rarement 1 $\mu\text{g/l}$. A la teneur de 1 $\mu\text{g/l}$ de thorium 232 correspond une radioactivité α de 4 mBq/l.

A titre d'information, il faut citer la présence dans les eaux minérales de deux autres éléments radioactifs naturels, le tritium et le carbone 14. La présence de ces deux isotopes radioactifs est utilisée surtout pour étudier l'âge de l'eau (voir note technique n° 7). Leur concentration dans les eaux minérales est très faible. A titre de rappel voici quelques éléments.

- **Le carbone 14** se forme dans l'atmosphère terrestre sous l'action des neutrons cosmiques sur l'azote :

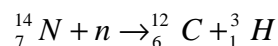


La concentration moyenne du carbone 14 dans le carbone naturel (principalement le carbone 12 stable) est de l'ordre de 10^{-12} . Il se désintègre en émettant des particules β (0,165 MeV) suivant le schéma ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \mathbf{b}$ (un neutron du noyau se transforme en proton).

Sa période est $T = 5600$ a.

Dans les eaux minérales, le carbone se trouve principalement sous forme d'ions bicarbonates (HCO_3). Les eaux les plus minéralisées en contiennent de l'ordre de 5 à 7 g, ce qui correspond à 1 à 1,3 g de carbone naturel. Or, l'activité radioactive du carbone 14 contenu dans 1 g de carbone naturel (en prenant une concentration de 10^{-12}) est d'environ 0,2 Bq de rayonnement β (0,165 MeV).

- **Le tritium** est l'isotope radioactif d'hydrogène qui se forme dans l'atmosphère sous l'action des neutrons cosmiques sur l'azote :



Cette production naturelle de tritium conduit à une concentration d'environ 1 atome de tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène stable (${}^1_1\text{H}$). L'industrie nucléaire contribue à une augmentation de la concentration du tritium dans les eaux (à signaler la très forte augmentation de l'abondance du tritium dans les eaux de pluie après les essais atomiques dans l'atmosphère, entre 1950 et 1960).

La désintégration du tritium donne lieu à une émission de rayonnement β négatif (0,0186 MeV) avec production d'hélium stable. La période est $T = 12,2$ a.



Pour caractériser la concentration du tritium dans les eaux minérales on utilise l'unité dite "UNITE TRITIUM" (UT).

1 UT = 1 atome de tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène.

Dans les eaux minérales, les concentrations en tritium s'échelonnent de 1 UT à environ 25 UT.

Les eaux très "anciennes" sont caractérisées par des concentrations d'1 ou 2 UT.

Les eaux "jeunes" ont des valeurs plus élevées.

A une eau ayant 1 UT correspond une radioactivité de 0,12 Bq/l (de rayonnement β de 0,0186 MeV).

3. RÉGLEMENTATION ET TEXTES DE RÉFÉRENCE

3.1 RÉGLEMENTATION APPLICABLE AUX EAUX MINÉRALES

La radioactivité des eaux minérales naturelles est évoquée dans deux textes réglementaires :

- décret 57-404 du 28 mars 1957 ; l'article 6 stipule que dans le cadre de l'instruction d'une demande d'autorisation d'exploiter une source d'eau minérale naturelle, il est procédé "**s'il y a lieu**,, à une détermination de la radioactivité."
- décret 89-369 du 6 juin 1989 (applicable uniquement aux eaux minérales naturelles conditionnées) ; à l'annexe I qui définit les prescriptions auxquelles est subordonnée l'exploitation d'une eau minérale naturelle, il est indiqué (§ 1.2.10) qu'il doit être procédé à la détermination de "la radio-actinologie à l'émergence" (les mêmes termes sont utilisés au § 1.2.10 de l'annexe 1 de la directive du Conseil n° 80/777/CEE du 15 juillet 1980 relative aux eaux minérales naturelles conditionnées).

Jusqu'à présent, aucun autre texte (ni circulaire, ni arrêté ministériel) ne précise en quoi consiste exactement la détermination de la radioactivité (ou de la "radio-actinologie"). De même aucun texte ne traite des limites "d'équivalent de dose absorbée" ou de seuil de concentrations en éléments radioactifs dans les eaux minérales.

En application des dispositions des décrets 57-404 et 89-369, l'Office pour la Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI) procède systématiquement à des analyses de radioactivité des eaux de toutes les nouvelles sources. Les bulletins d'analyse comportent les éléments suivants :

- activité volumique bêta-totale en Bq/l ou mBq/l
- activité volumique alpha-totale en Bq/l ou mBq/l
- radium 226 en Bq/l ou mBq/l
- uranium naturel en µg/l
- thorium en µg/l
- tritium en Bq/l
- potassium en mg/l
- radon 222

Les éléments dont les résultats sont fournis en Bq/l, sont déterminés par des méthodes spécifiques aux mesures de radioactivité (compteurs à scintillomètre, compteur Geiger...).

Les activités volumiques bêta-**totale** et alpha-**totale** ou bêta-**globale** et alpha-**globale**, sont déterminées à titre indicatif sur les résidus secs des échantillons d'eau. Il en résulte que la valeur portée sur le bulletin d'analyse ne comprend pas l'activité alpha du radon.

Les valeurs de l'activité bêta-totale des eaux minérales sont généralement inférieures à 1 Bq/l. Cependant il peut arriver que certaines eaux qui circulent dans des terrains granitiques ou qui sont fortement chargées en sels de potassium (1 mg de potassium naturel a une activité d'environ 26 mBq), aient des valeurs atteignant 10 Bq/l.

Les valeurs de l'activité alpha-totale s'échelonnent entre 0,01 et 1 Bq/l, voire exceptionnellement 3 Bq/l.

La concentration en radium 226, exprimée en Bq, varie généralement entre 0,01 et 1 Bq/l. Le radium est l'élément qui contribue généralement le plus à l'activité volumique alpha-totale.

L'uranium naturel, exprimé en µg/l, contribue, comme le radium à l'activité volumique alpha-totale (1 µg d'uranium naturel a une activité de 24 mBq). La concentration dans les eaux minérales varie généralement entre 0,1 µg/l et 5 µg/l. Exceptionnellement, certaines eaux peuvent dépasser à l'émergence 10 µg/l (240 mBq/l).

La teneur en thorium est généralement inférieure à 1 µg/l (environ 4 mBq/l).

La teneur en potassium naturel est donnée à titre indicatif. Le potassium 40 présent dans le potassium naturel (abondance de 10^{-4}), contribue fortement à l'activité bêta-totale : 1 mg de potassium naturel représente une activité bêta de 26 mBq. Or les eaux minérales peuvent en contenir plus de 100 mg/l (2600 mBq/l).

La détermination de la concentration en tritium est faite à titre indicatif, comme cela se pratique systématiquement pour les eaux de consommation courante dans le but de déceler un apport éventuel de radionucléides artificiels rejetés accidentellement par l'industrie nucléaire dans les eaux de surface (la directive européenne impose de vérifier que dans l'eau de consommation, l'activité du tritium reste inférieure à 100 Bq/l – dans le cas contraire, il y a suspicion d'une présence de radioéléments artificiels). Les méthodes de détermination du tritium utilisées par l'OPRI ne permettent pas de descendre sous le seuil de 10 Bq/l (environ 83 UT). Or dans les eaux minérales, la concentration en tritium est souvent inférieure à 5 UT (0,6 Bq/l) et elle dépasse rarement 25 UT (3 Bq/l). Le bulletin d'analyse de l'OPRI porte pratiquement toujours la mention "tritium : < 10 Bq/l".

Si les activités volumiques alpha-totale ou bêta-totale d'une eau minérale naturelle dépassent les valeurs-guides recommandées par l'OMS pour les eaux de boisson (voir annexe 5 : 0,1 Bq/l pour alpha-globale et 1 Bq/l pour bêta-globale), l'OPRI accompagne le bulletin d'analyse d'un commentaire en conseillant parfois de limiter la consommation de cette eau à 2 l/jour ou encore à quelques litres par semaine.

Il est à signaler que les prélèvements transmis pour analyse à l'OPRI sont effectués à l'émergence. Or, il a été constaté que les traitements de déferrisation ou de démanganisation pratiqués sur certaines eaux minérales conditionnées, contribuent à faire baisser la radioactivité de manière assez significative. Par conséquent, pour avoir une meilleure estimation de la quantité de radionucléides ingérés avec l'eau minérale, il est également procédé à la détermination de la radioactivité de l'eau, après son conditionnement.

3.2 RÉGLEMENTATION APPLICABLE AUX EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE

Les textes applicables aux eaux destinées à la consommation humaine (adduction en eau du public) sont :

- décret 89/3 du 3 janvier 1989 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minérales naturelles ;
- directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

Le décret 89/3 reprend en annexe les limites de certains paramètres physico-chimiques que doivent respecter les eaux de consommation courante, mais jusqu'à présent il n'existe aucun critère en ce qui concerne la radioactivité.

La directive 98/83/CE (non applicable aux eaux minérales naturelles), comporte en annexe I, partie C, un tableau concernant la radioactivité, dans lequel figurent deux paramètres, le tritium (valeur paramétrique de 100 Bq/l) et "dose totale indicative" (valeur paramétrique de 0,10 mSv/an). Cette directive doit faire l'objet d'une transposition dans la réglementation nationale avant la fin de l'an 2000 et les normes de qualité devront être respectées en 2003 (à noter que généralement le respect des normes de radioactivité pose moins de problème que les concentrations limites de certains éléments indésirables).

3.3 RECOMMANDATIONS DE L'OMS

Les normes européennes de radioactivité applicables aux eaux de consommation (et celles qui seront vraisemblablement fixées pour les eaux minérales naturelles), s'inspirent des recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé, dont un extrait figure en annexe 5 de la présente note.

Ces recommandations sont basées sur les principes généraux suivants :

- l'OMS considère qu'à l'échelle mondiale, l'exposition moyenne de l'homme aux rayonnements d'origine naturelle est de l'ordre de 2,4 mSv/an ;
- la **dose effective engagée** attribuable à la consommation d'eau pendant un an, doit être inférieure à 5 % de la dose d'origine naturelle (2,4 mSv/an), soit 0,1 mSv/an ;
- la **dose effective engagée** est la dose effective totale reçue tout au long de la vie par suite d'ingestion de radionucléides (la dose effective totale est la somme des doses doublement pondérées pour tenir compte des organes touchés et du type de rayonnement, α ou β) ;
- pour le calcul de la dose effective engagée, on considère qu'un adulte consomme **2 litres d'eau par jour pendant toute l'année (et toute sa vie)** ;
- le métabolisme est pris en compte dans l'estimation des radionucléides qui persistent dans le corps humain, après leur ingestion avec l'eau de boisson ;

- en première approche, on considère que la dose effective engagée ne dépasse pas 0,1 mSv/an si les activités globales alpha et bêta, restent respectivement inférieures à 0,1 Bq/l et 1 Bq/l ;
- si l'une ou l'autre des activités globales alpha et bêta, dépasse respectivement 0,1 Bq/l et 1 Bq/l, il faut procéder à l'identification des radionucléides en présence et faire le calcul précis de la dose effective engagée (si la dose effective engagée est supérieure à 0,1 mSv/an, l'eau est considérée impropre à la consommation et des mesures correctives doivent être envisagées).

4. CONCLUSION

Les eaux minérales, comme toutes les eaux souterraines, contiennent des radionucléides d'origine naturelle, dont la concentration dépend de nombreux paramètres : nature des terrains traversés, temps de contact, température de l'eau, solubilité des éléments, ...

L'évaluation de l'impact sur l'organisme humain des radionucléides ingérés par la consommation d'eau, est très complexe. Pour la faire sérieusement, il faut connaître la quantité de chaque radioélément absorbé et tenir compte de la faculté de l'organisme humain à l'éliminer ou à le retenir.

Le seul document de référence disponible actuellement est la recommandation de l'OMS qui s'applique à l'eau de consommation courante. Elle s'appuie sur les critères suivants :

- la dose effective engagée attribuable à la consommation d'eau pendant un an, doit rester inférieure à 0,1 mSv ;
- pour le calcul de la dose effective engagée, on considère qu'un adulte consomme 2 litres d'eau par jour, pendant toute sa vie ;
- le calcul de la **dose** (de radioactivité) **absorbée** (en mSv/an) par les tissus vivants, à partir de la quantité de radionucléides (Bq/l) contenus dans l'eau consommée, se fait à l'aide de "facteurs de conversion" qui tiennent compte du métabolisme (faculté de l'organisme à éliminer les radionucléides ingérés).

La directive européenne 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine fixe à 0,1 mSv/an la "valeur paramétrique" de la "dose totale indicative" (il faut constater avec regret que la signification exacte de cette expression ne figure ni dans la directive 98/83/CE, ni dans la directive générale 96/29/EURATOM du Conseil du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants).

Pour les eaux minérales, la réglementation française ne comporte pas encore de normes de qualité en matière de radioactivité. Afin de combler cette lacune, un groupe de travail piloté par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, a été chargé d'examiner ce problème.

BIBLIOGRAPHIE

- 1990 Eaux minérales et radioactivité – Hydrogéologie n° 4 – pp 267-278 – Édition BRGM par M.L. REMY et N. LEMAITRE
- 1994 Directives de qualité pour l'eau de boisson – Deuxième édition – Organisation Mondiale de la Santé – Genève 1994
- 1994 L'analyse de l'eau – Rodier – 8^{ème} Édition DUNOD
- 1995 Le tritium de l'Environnement à l'Homme – Les éditions de Physique – IPSN – Y. BELOT, M. ROY, H. METIVIER
- 1998 Journal Officiel des Communautés Européennes – L330/32 à 54

Tableau 1

TERMES ET UNITÉS RADIOLOGIQUES

TERME	DEFINITION	UNITE	VALEUR
Activité (A)	<p>Quotient de dN par dt où dN est le nombre de transformations nucléaires spontanées qui se produisent dans une quantité de radionucléide pendant le temps dt.</p> $A = \frac{dN}{dt}$	<p>Becquerel (Bq) nom spécial de l'unité SI d'activité. L'emploi du Curie (Ci) ou de son sous multiple le pico-Curie (pCi) est encore rencontré. Le Ci est une unité historique qui correspond à l'activité de 1 g de radium 226.</p>	<p>1 Bq = 1 désintégration par seconde 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq 1 Bq = $2,7027 \cdot 10^{-11}$ Ci</p>
Dose absorbée (D)	<p>Quotient de de par dm où de est l'énergie moyenne communiquée par les rayonnements ionisants à la matière dans un élément de volume et dm, la masse de matière contenue dans cet élément de volume.</p> $D = \frac{de}{dm}$	<p>Gray (Gy) nom spécial de l'unité SI de dose absorbée. L'emploi du rad (rd) est encore rencontré.</p>	<p>1 Gy = 1 J/kg 1 rd = 10^{-2} Gy 1 Gy = 100 rd</p>
Équivalent de dose absorbée (H)	<p>Produit de la dose absorbée D par le facteur de qualité et par le produit de tous les autres facteurs modificatifs. Pour l'irradiation externe par les rayonnements X, γ et des électrons β, le facteur de qualité est égal à 1. Pour l'irradiation interne par les rayonnements α le facteur de qualité est égal à 20.</p>	<p>Sievert (Sv) nom spécial de l'unité SI d'équivalent de dose. L'emploi du rem est encore rencontré.</p>	<p>1 Sv = 1 J/kg 1 rem = 10^{-2} Sv 1 Sv = 100 rem</p>

Tableau 2

RADIONUCLÉIDES NATURELS

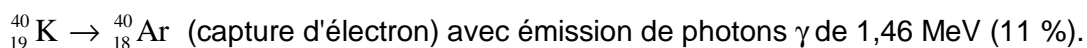
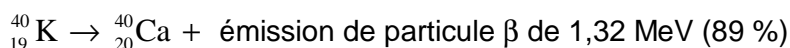
Nom	Symbole	Numéro atomique	Isotopes
Actinium	Ac	89	227, 228
Astate	At	85	215, 216, 218
Bismuth	Bi	83	210, 211, 212, 214
Carbone	C	6	14
Francium	Fr	87	223
Lanthane	La	57	138
Platine	Pt	78	190
Plomb	Pb	82	210, 211, 212, 214
Polonium	Po	84	210, 211, 212, 214, 215, 216, 218
Potassium	K	19	40
Protactinium	Pa	91	231, 234
Radium	Ra	88	223, 224, 226, 228
Radon	Rn	86	219, 220, 222
Rubidium	Rb	37	87
Samarium	Sm	62	147
Thorium	Th	90	227, 228, 230, 231, 232, 234
Thallium	Tl	81	206, 207, 208, 210
Tritium	H	1	isotope 3 de l'hydrogène
Uranium	U	92	234, 235, 238

ANNEXE 1

EXEMPLES DE CALCUL DES ACTIVITÉS ET DES DOSES ABSORBÉES

Exemple 1 : Le corps humain contient environ 140 g de potassium naturel pour un poids moyen de 70 kg, soit 2 g de potassium naturel par kg de tissus vivants (les aliments en contiennent entre 3 et 40 g/kg de matière sèche, toutefois, quelle que soit la quantité ingérée, la régulation métabolique assure une concentration moyenne dans le corps humain d'environ 2 g/kg).

Le potassium naturel est composé essentiellement de potassium 39 ($^{39}_{19}\text{K}$) stable et d'une très faible quantité (proportion 10^{-4}) de potassium 40 radioactif ($^{40}_{19}\text{K}$) qui se désintègre suivant 2 schémas :



Dans 2 g de potassium naturel (environ $310 \cdot 10^{20}$ atomes), il y a 0,2 mg ($310 \cdot 10^{16}$ atomes) de potassium 40 radioactif, dont l'activité radioactive est de l'ordre de 52 Bq (46 Bq de particules β et 6 Bq de photons γ).

L'énergie dissipée dans 1 kg de tissus vivants par les particules β est d'environ :

$$46 \cdot 1,32 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ (J/s.kg)} = 97,1 \cdot 10^{-13} \text{ Sv/s soit de l'ordre de } 0,3 \text{ m Sv/an.}$$

(1 Mev = $1,6 \cdot 10^{-13}$ J)

Exemple 2 (contrairement à l'exemple du potassium qui correspond à un cas concret, l'exemple ci-après qui concerne le radium, est fictif) : La masse de 0,1 ng (10^{-10} g) de radium 226 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) représente environ $27 \cdot 10^{10}$ atomes. L'activité radioactive de cette masse est de 37 Bq, c'est à dire qu'à chaque seconde environ 4 atomes de radium 226 se désintègrent en donnant naissance à 4 atomes de radon 222 et en émettant 4 particules α de 4,8 MeV chacune et des photons γ de faible énergie (environ 0,187 MeV par désintégration).

Si cette masse de 0,1 ng de radium 226 se trouvait disséminée dans 1 kg de tissus musculaires, ces derniers absorberaient à chaque seconde l'énergie des 4 particules α .

L'énergie radioactive dissipée serait donc de :

$$4.4,8 \text{ MeV/s.kg} = 4.4,8.1,6.10^{-13} \text{ J/s kg}$$

(1 MeV = $1,6.10^{-13}$ J)

$$\text{soit } 30,7.10^{-13} \text{ J/s.kg}$$

S'agissant de tissus vivants, "l'équivalent de dose absorbée" est obtenu en multipliant cette énergie par $FQ = 20$ (facteur de qualité des particules α) :

$$20.30,7.10^{-13} \text{ J/s.kg} = 614.10^{-13} \text{ Sv/s}$$

Si la concentration en radium 226 dans les tissus musculaires restait inchangée (0,1 ng/kg), l'équivalent de dose absorbée durant une année serait :

$$614.10^{-13}.365.24.3600 \text{ (Sv/an)} \text{ soit environ } 2 \text{ m Sv/an.}$$

Si les rayons γ émis à l'occasion de la désintégration des 4 atomes de radium 226, dissipent toute leur énergie dans la même masse de tissus vivants (ce qui n'est pas toujours le cas, puisque la masse musculaire n'arrête qu'une partie des rayons γ) l'équivalent de dose absorbée dû aux rayons γ , serait de :

$$4.0,187.1,6.10^{-13} \text{ (Sv/s)} = 1,2.10^{-13} \text{ Sv/s}$$

valeur insignifiante par rapport à l'équivalent de dose absorbée des particules α .

Exemple 3 : Un minerai d'uranium contient environ 1 g d'uranium naturel par kg de substance rocheuse (la teneur en uranium dans le minerai peut varier de 0,04 % à 1,5 % ; pour les teneurs inférieures à 0,03 % on considère qu'il s'agit de « roche stérile »). L'uranium naturel est composé de 3 isotopes radioactifs d'uranium (234, 235 et 238).

La masse de 1 g d'uranium 238 représente $\left(\frac{6,023.10^{23}}{238}\right)$ atomes. La période étant $T = 4,5.10^9$ années, l'activité radioactive de cette masse est 12400 Bq.

L'activité de 1 g d'uranium 235 ($T = 7.10^8$ années) est de 80 000 Bq et celle de 1 g d'uranium 234 ($T = 2,5.10^5$ années) est de 222.10^6 Bq.

L'uranium naturel étant composé de 99,3 % de U^{238} , 0,7 % de U^{235} et 0,005 % de U^{234} , l'activité d'un bloc de minerai d'uranium naturel, sera de :

$$(0,993.12\ 400 + 0,007.80\ 000 + 5.10^{-5}.222.10^6)\text{Bq, soit environ } 24\ 000 \text{ Bq/kg.}$$

Les trois isotopes radioactifs de l'uranium naturel émettent des particules α d'environ 4,2 Mev chacune, accompagnées d'un rayonnement γ d'environ 0,05 Mev.

Les particules α étant arrêtées par la substance rocheuse du bloc de minerai (ce qui n'est pas le cas pour les rayons γ), l'énergie dissipée (ou la « dose absorbée ») dans le bloc sera :

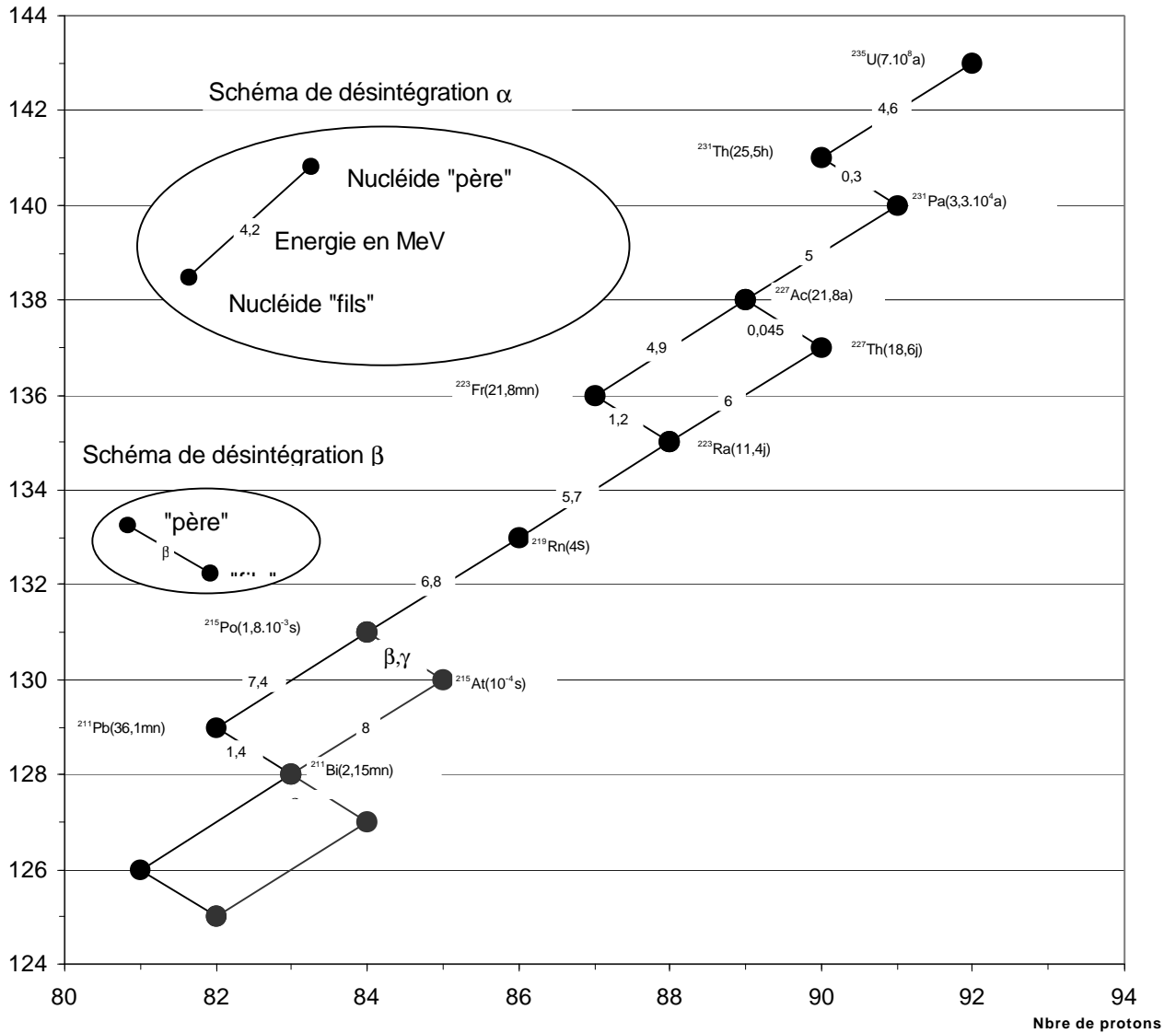
$$24\ 000 \cdot 4,2 \text{ MeV/s.kg} = 24000 \cdot 4,2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/s.kg} = 161 \cdot 10^{-10} \text{ Gy/s}$$

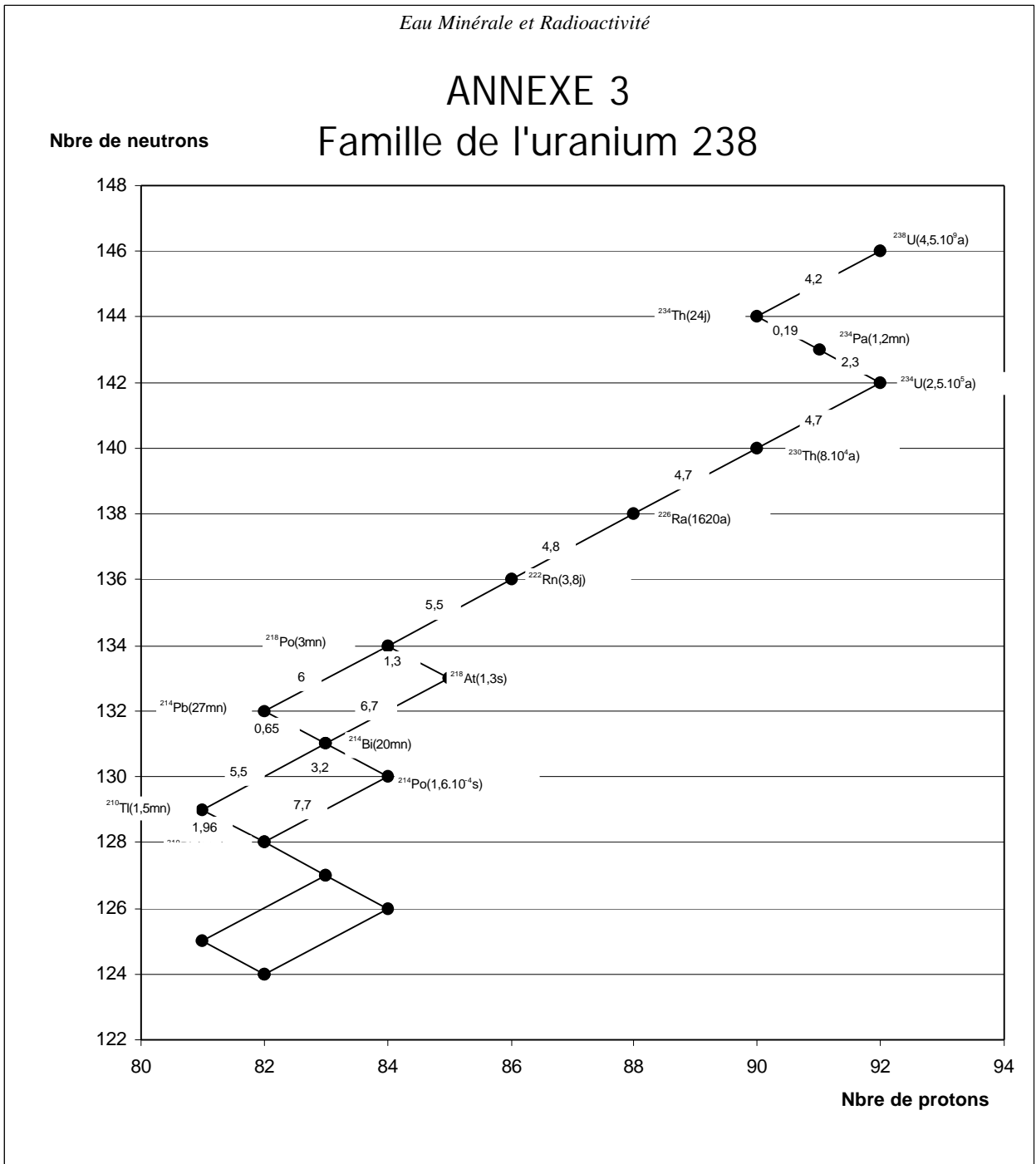
(ce calcul fait abstraction du rayonnement α et β émis par les autres descendants des deux familles d'uranium ou du thorium certainement présents dans le bloc de minerai).

ANNEXE 2

Famille de l'uranium 235

Nbre de neutrons

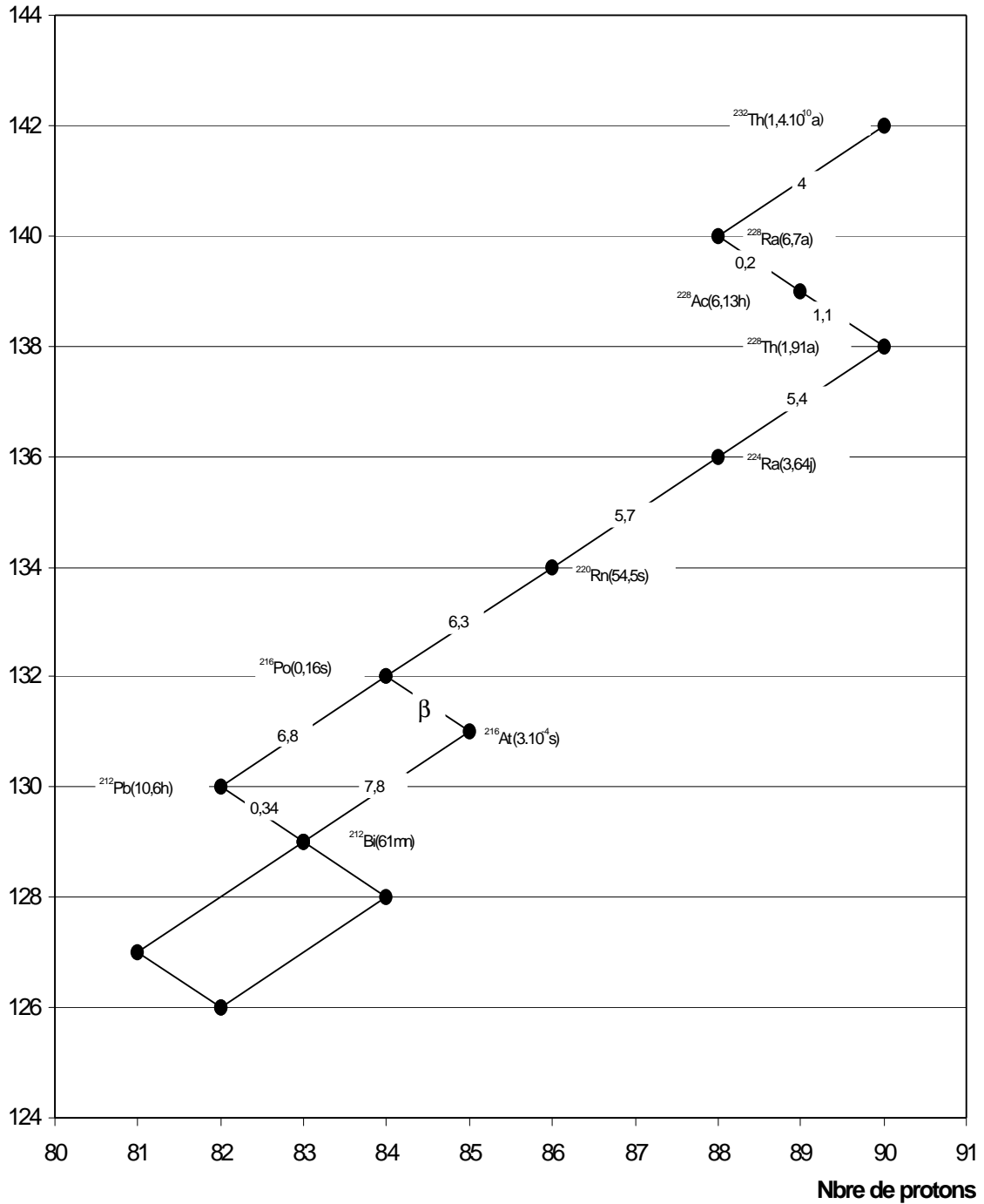




ANNEXE 4

Famille du thorium 232

Nbre de neutrons



ANNEXE 5

EXTRAIT DES RECOMMANDATIONS OMS

DIRECTIVES DE QUALITE POUR L'EAU DE BOISSON

Deuxième édition – Organisation Mondiale de la Santé – Genève 1994

4. Aspects radiologiques

4.1 Introduction

Les valeurs indicatives pour la radioactivité de l'eau de boisson recommandées dans la première édition des *Directives de qualité pour l'eau de boisson* en 1984 étaient fondées sur les données disponibles à l'époque en ce qui concerne les risques d'exposition aux sources de rayonnements. Depuis lors, de nouvelles informations ont été publiées sur les conséquences pour la santé de l'exposition aux rayonnements, les risques ont été réévalués et les recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) ont été révisées. Ces nouvelles informations ont été mises à profit lors de la rédaction des recommandations du présent chapitre.

L'objet de ces recommandations relatives aux substances radioactives présentes dans l'eau de boisson est d'aider les autorités compétentes à déterminer si la qualité de l'eau la rend propre à la consommation humaine.

4.1.1 Exposition à la radioactivité ambiante

La radioactivité ambiante provient de différentes sources naturelles et artificielles. Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) a estimé que les sources naturelles contribuent pour plus de 98 % à la dose de rayonnements reçue par la population (à l'exclusion des irradiations médicales). La contribution des centrales nucléaires et des retombées des essais d'armes nucléaires est très faible. A l'échelle mondiale, l'exposition moyenne de l'homme aux rayonnements de source naturelle est de 2,4 mSv/année. Cette exposition varie beaucoup d'un lieu à l'autre, car elle dépend de nombreux facteurs, comme l'altitude, la quantité et le type de radionucléides présents dans le sol et la quantité reçue de l'air, de l'eau et des aliments. La contribution de l'eau de boisson à l'exposition totale est très faible et elle est due en grande partie aux radionucléides naturels de la famille de l'uranium et du thorium.

Diverses activités humaines peuvent accroître la quantité de radionucléides naturels présents dans l'eau de boisson. Les radionucléides provenant des centrales nucléaires ou des applications médicales et autres utilisations de matériaux radioactifs peuvent pénétrer dans les réseaux de distribution ; l'importance de ces sources d'exposition est normalement limitée par les contrôles réglementaires pratiqués à la source ou en cours d'utilisation et c'est dans le cadre de ce mécanisme de réglementation que des mesures correctrices devront être prises en cas de risque de contamination.

4.1.2 Conséquences sanitaires potentielles de l'exposition aux rayonnements

L'exposition aux rayonnements ionisants, qu'ils soient naturels ou artificiels, peut avoir deux sortes d'effets sur la santé. Les effets pour lesquels la gravité des dommages est proportionnelle à la dose et pour lesquels il existe un seuil au-dessous duquel ils ne se produisent pas sont appelés effets "déterministes". Dans les conditions normales, la dose reçue du fait de la radioactivité naturelle et d'une exposition normale à des activités réglementées est bien inférieure à ce seuil ; aussi les effets déterministes n'ont-ils pas été pris en compte dans les recommandations ci-après. Les effets dont la probabilité d'apparition est proportionnelle à la dose sont appelés effets "stochastiques" et on considère qu'il n'existe pas de seuil au-dessous duquel ces effets n'apparaîtraient pas. L'effet stochastique le plus préoccupant est le cancer.

Étant donné que les différents types de rayonnements ont une efficacité biologique différente et que tous les organes et tissus de l'organisme n'ont pas la même sensibilité aux rayonnements, la CIPR a introduit des facteurs de pondération en fonction du rayonnement et des tissus pour établir l'équivalence des effets. La somme des doses doublement pondérées reçues par tous les tissus et organes du corps donne la mesure du dommage global et est appelée la dose effective. De plus, les radionucléides reçus par l'organisme peuvent persister dans celui-ci et, dans certains cas, l'exposition résultante peut s'étendre sur des mois ou des années. La dose effective engagée est la dose effective totale reçue tout au long de la vie par suite de l'absorption d'un radionucléide. C'est cette mesure de l'exposition qui nous intéresse ici ; dans les pages qui suivent, le terme "dose" désigne la dose effective engagée, qui est exprimée en sieverts (Sv). Le risque de conséquences dommageables pour la santé d'une exposition aux rayonnements est fonction de la dose totale reçue de toutes sources. La CIPR a révisé son estimation du risque (espérance mathématique) de cancer mortel sur la vie entière pour la population générale. Ce risque est désormais évalué à 5×10^{-2} par sievert. (Il n'est pas tenu compte d'un faible risque supplémentaire dû aux cancers non mortels ou aux effets héréditaires.)

4.1.3 Recommandations

- Le niveau de référence recommandé pour la dose effective engagée attribuable à la consommation d'eau de boisson pendant un an est de 0,1 mSv. Ce niveau de référence représente moins de 5 % de la dose effective moyenne attribuable annuellement au rayonnement de fond naturel.
- Au-dessous de ce niveau de référence, l'eau de boisson est propre à la consommation humaine et aucune mesure visant à réduire la radioactivité n'est nécessaire.
- En pratique, les valeurs guides recommandées pour l'activité volumique sont de 0,1 Bq/litre pour la: radioactivité alpha globale et 1 Bq/litre pour la radioactivité bêta globale.

Ces recommandations s'appliquent aux conditions normales de fonctionnement de réseaux de distribution d'eau existants ou nouveaux. Elles ne s'appliquent pas aux approvisionnements en eau contaminés lors d'un accident ayant entraîné la libération de radionucléides dans l'environnement. On trouvera ailleurs des directives applicables aux situations d'urgence (voir bibliographie).

Les recommandations ne font aucune différence entre les radionucléides d'origine naturelle ou artificielle.

4.2 Application de la dose de référence

En pratique, la dose de référence doit être exprimée en indiquant l'activité volumique des radionucléides présents dans l'eau de boisson.

La dose de radioactivité fournie à une personne par l'eau de boisson dépend non seulement de la quantité ingérée, mais aussi de facteurs métaboliques et dosimétriques. Les valeurs guides pour la concentration volumique ont été établies en admettant que la quantité totale de substances radioactives ingérées provient de la consommation de deux litres d'eau par jour pendant un an et elles ont été calculées sur la base du métabolisme chez l'adulte. Les valeurs guides n'ont pas à être modifiées pour tenir compte de l'influence de l'âge sur le métabolisme et des différences de consommation d'eau, car elles sont fondées sur l'exposition pendant toute la vie et offre une marge de sécurité suffisante. Des facteurs métaboliques et dosimétriques ont été pris en compte lors de l'élaboration des facteurs de conversion de dose, exprimés en sieverts par becquerel, qui permettent de passer de la quantité (en becquerels) de substances radioactives ingérées à une dose exprimée en sieverts.

Le tableau 8 donne des exemples de concentrations de radionucléides (concentrations de référence) correspondant à la dose de référence de 0,1 mSv/année. Ces concentrations ont été calculées en utilisant les facteurs de conversion de doses du United Kingdom National Radiological Protection Board selon la formule :

Concentration de référence (Bq/litre)

$$= \frac{1 \times 10^{-4} \text{ (Sv / année)}}{730 \text{ (litre / année)} \times \text{facteur de conversion de dose (Sv / Bq)}}$$

$$= \frac{1.4 \times 10^{-7} \text{ (Sv / litre)}}{\text{facteur de conversion de dose (Sv / Bq)}}$$

Tableau 8. Activité volumique de divers radionucléides dans l'eau de boisson correspondant à une dose de 0.1 mSv pour une année de consommation

Radionucléide ^a	Facteur de conversion de dose (Sv/Bq) ^b	Valeur théorique arrondie (Bq/litre)
³ H	1,8 x 10 ⁻¹¹	7 800
¹⁴ C	5,6 x 10 ⁻¹⁰	250
⁶⁰ Co	7,2x10 ⁻⁹	20
⁸⁹ Sr	3,8x10 ⁻⁹	37
⁹⁰ Sr	2,8x10 ⁻⁸	5
¹²⁹ I	1,1 x10 ⁻⁷	1
¹³¹ I	2,2x10 ⁻⁸	6
¹³⁴ Cs	1,9 x10 ⁻⁸	7
¹³⁷ Cs	1,3 x10 ⁻⁸	10
²¹⁰ Pb	1,3 x10 ⁻⁶	0,1
²¹⁰ Po	6,2 x 10 ⁻⁷	0,2
²²⁴ Ra	8,0 x 10 ⁻⁸	2
²²⁶ Ra	2,2x10 ⁻⁷	1
²²⁸ Ra	2,7 x 10 ⁻⁷	1
²³² Th	1,8 x10 ⁻⁶	0,1
²³⁴ Th	3,9x10 ⁻⁸	4
²³⁸ U	3,6 x 10 ⁻⁸	4
²³⁹ Pu	5,6 x 10 ⁻⁷	0,3

^a Pour le ⁴⁰K, voir fin du § 4.2, Pour le ²²²Rn, voir section 4.2.3.

^b Source : National Radiological Protection Board, *Committed equivalent organ doses and committed effective doses from intakes of radionuclides*. Chilton, Didcot, 1991.

Les directives précédentes recommandaient d'utiliser la valeur moyenne des activités globales alpha et bêta pour les contrôles de routine. Ces moyennes étaient fixées respectivement à 0,1 Bq/litre et 1 Bq/litre. Le tableau 9 indique les doses correspondant à ces niveaux d'activités globales alpha et bêta pour un certain nombre de radionucléides. Pour certains d'entre eux, comme le ²²⁶Ra et le ⁹⁰Sr, la dose correspondante est bien inférieure à 0,1 mSv par an. On peut voir aussi sur ce tableau que si certains radionucléides comme le ²³²Th, le ²²⁸Ra ou le ²¹⁰Pb sont responsables à eux seuls d'une activité alpha globale de 0,1 Bq/litre ou d'une activité bêta globale de 1 Bq/litre, la dose de référence de 0,1 mSv par an sera dépassée. Toutefois, ces radionucléides ne représentent généralement qu'une petite fraction de l'activité globale. En outre, s'ils présentaient une activité volumique élevée, il en serait probablement de même pour d'autres radionucléides. Cela se traduirait par des activités globales alpha et bêta supérieures à la limite au-dessus de laquelle une enquête doit être entreprise et des analyses spécifiques devraient alors être effectuées. En conséquence, les valeurs limites recommandées pour le contrôle de l'eau de boisson, au-dessous desquelles aucune mesure supplémentaire n'est nécessaire, continuent d'être fixées à 0,1 Bq/litre pour la radioactivité globale alpha et 1 Bq/litre pour la radioactivité globale bêta.

Les méthodes normales d'analyse ne détectent pas les radionucléides émettant des particules bêta de faible énergie, comme le ³H et le ¹⁴C, ni certains éléments gazeux ou volatils comme le ²²²Rn et le ¹³¹I. Les valeurs indiquées pour les activités globales moyennes alpha et bêta ne concernent pas ces radionucléides de sorte que, si leur présence est soupçonnée, il faudra employer des techniques spéciales d'échantillonnage et de mesure.

Tableau 9. Exemples de doses résultant d'un an de consommation d'eau de boisson contenant l'un des émetteurs alpha ou bêta indiqués, avec une activité volumique de 0,1 Bq/litre ou 1 Bq/litre^a, respectivement

Radionucléide	Dose (mSv)
Émetteurs alpha (0,1 Bq/litre)	
²¹⁰ Po	0,045
²²⁴ Ra	0,006
²²⁶ Ra	0,016
²³² Th	0,130
²³⁴ U	0,003
²³⁸ U	0,003
²³⁹ Pu	0,04
Émetteurs bêta (1 Bq/litre)	
⁶⁰ Co	0,005
⁸⁹ Sr	0,003
⁹⁰ Sr	0,020
¹²⁹ I	0,080
¹³¹ I	0,016
¹³⁴ Cs	0,014
¹³⁷ Cs	0,009
²¹⁰ Pb	0,95
²²⁸ Ra	0,20

^a Calculs effectués à l'aide des facteurs de conversion de dose publiés par le National Radiological Protection Board dans *Committed equivalent organ doses and committed -effective doses from intakes of radionuclides*, Chilton, Didcot, 1991.

Si l'activité volumique globale bêta approche ou dépasse 1 Bq/litre, cela ne veut pas nécessairement dire que la dose de référence a été dépassée. Cette situation peut en effet résulter de la présence de ⁴⁰K, qui constitue environ 0,01 % du potassium naturel. Le potassium est un élément essentiel apporté principalement par les aliments et dont l'absorption obéit aux mécanismes d'homéostasie. Ainsi, l'ingestion de ⁴⁰K, dont le facteur de conversion de dose est relativement faible (5×10^{-9} Sv/Bq), avec l'eau de boisson, contribue beaucoup moins à la dose totale que celle de nombreux autres émetteurs bêta. L'identification des différents radionucléides présents dans l'échantillon donnera une idée plus claire de la situation.

4.2.1 Méthodes d'analyse

L'Organisation internationale de Normalisation (ISO) a publié des méthodes normalisées de mesure de l'activité volumique globale alpha et de l'activité volumique globale bêta dans l'eau. Les niveaux recommandés pour ces activités doivent être supérieurs aux limites de détection, même si celles-ci dépendent des radionucléides présents, des solides dissous dans l'échantillon et des conditions de comptage. La limite de détection de l'ISO pour l'activité globale alpha exprimée en équivalent ²³⁹Pu est de 0,04 Bq/litre, tandis que pour l'activité globale bêta, exprimée en équivalent ¹³⁷Cs, elle est comprise entre 0,04 et 0,1 Bq/litre.

Pour l'analyse des différents radionucléides présents dans l'eau de boisson, il existe des recueils généraux de méthodes, en plus des méthodes spécifiques publiés dans la littérature technique (voir bibliographie).

4.2.2 Stratégie d'évaluation de l'eau de boisson

Si l'activité volumique globale alpha dépasse 0,1 Bq/litre ou si l'activité volumique globale bêta dépasse 1 Bq/litre, il faut identifier les radionucléides responsables et mesurer l'activité volumique de chacun d'entre eux. A partir de ces données, il faut ensuite estimer une dose pour chaque radionucléide et déterminer la somme de ces doses. Si l'inégalité suivante est respectée, aucune autre mesure ne s'impose

$$\sum_i \frac{C_i}{RC_i} \leq 1$$

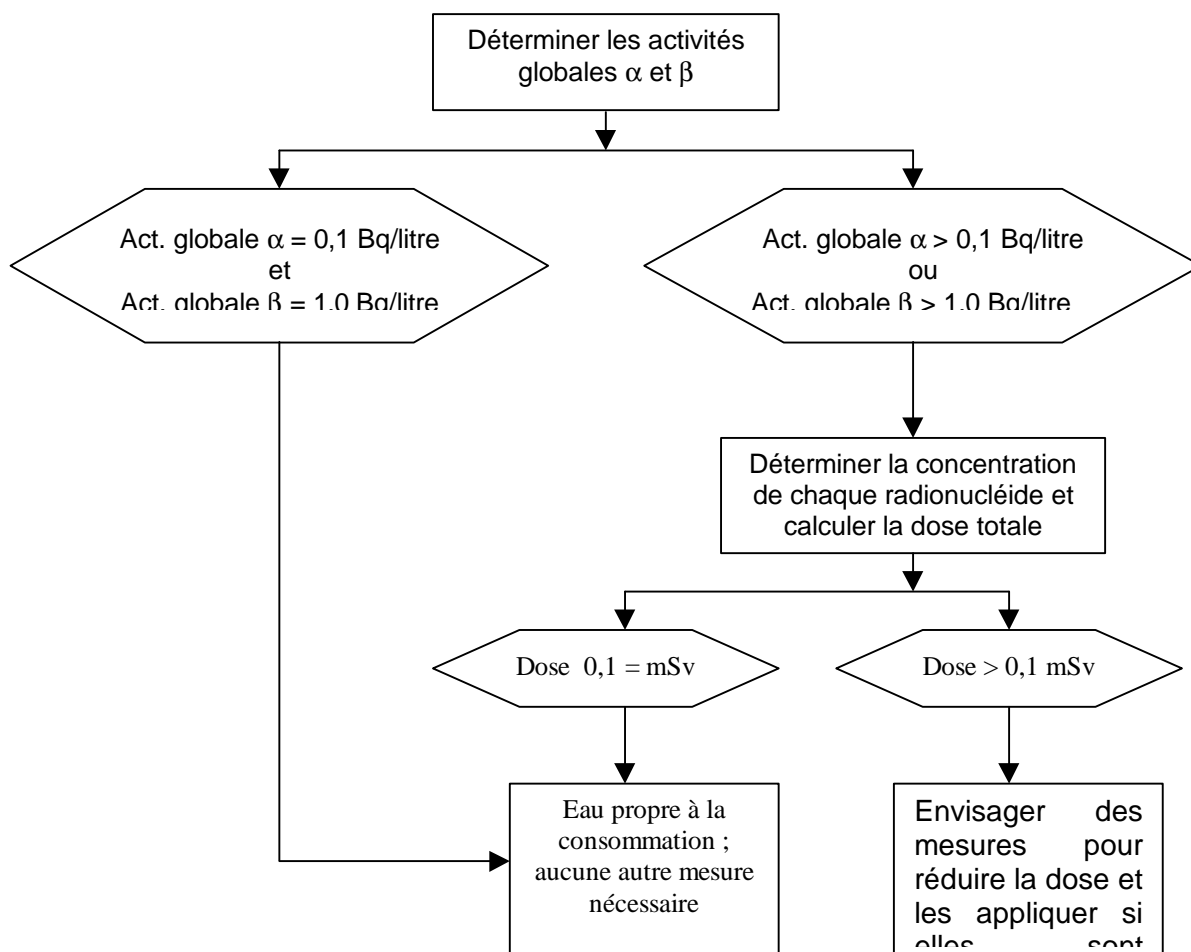
où C_i est l'activité volumique mesurée du radionucléide i et RC_i l'activité volumique de référence du radionucléide i correspondant à une dose effective engagée de 0,1 mSv pour une consommation de deux litres d'eau par jour pendant un an (voir tableau 8).

- Si l'on soupçonne la présence de radionucléides émetteurs alpha pour lesquels le facteur de conversion de dose est élevé, on peut également utiliser cette formule lorsque les activités globales alpha et bêta se rapprochent des limites de 0,1 Bq/litre et 1 Bq/litre. Si la somme dépasse l'unité pour un seul échantillon, la dose de référence de 0,1 mSv ne sera dépassée que si l'exposition à ces mêmes concentrations se poursuit pendant une année entière. Par conséquent, un tel résultat ne signifie pas que l'eau est impropre à la consommation, mais

seulement que l'évaluation doit être poussée plus loin, en procédant au besoin à des prélèvements supplémentaires.

L'autorité compétente doit alors examiner les moyens qui s'offrent à elle pour réduire la dose. Si des mesures correctives sont envisagées, toute stratégie susceptible d'être retenue devra d'abord être justifiée (autrement dit, elle doit produire un avantage net) puis optimisée conformément aux recommandations de la CIPR, de façon à ce que cet avantage soit maximal. L'application de ces recommandations est schématisé à la figure 1.

Figure 1. Application des recommandations relatives aux radionucléides dans l'eau de boisson sur la base d'une dose annuelle de référence de 0,1 mSv



4.2.3 Radon

Le calcul de l'activité volumique du ²²²Rn dans l'eau de boisson par la méthode de la dose de référence présente des difficultés en raison de la facilité avec laquelle le radon s'échappe de l'eau au cours des manipulations et de l'importance de l'inhalation comme voie d'absorption. L'agitation et le transvasement de l'eau d'un récipient dans un autre libère le radon dissous. Si l'eau est laissée au repos un certain temps, l'activité du radon diminue et l'ébullition l'élimine complètement. Il est donc important de tenir compte de la forme sous laquelle se présente l'eau consommée lors de l'évaluation de la dose absorbée par ingestion. En outre, l'utilisation de l'eau pour d'autres usages domestiques augmentera la concentration de radon dans l'air et, par conséquent, la dose

absorbée par inhalation. Cette dose dépend beaucoup de la forme sous laquelle l'eau est absorbée, des usages domestiques qui en sont faits et du mode de construction des habitations, toutes caractéristiques qui varient largement d'une région du monde à l'autre. Il est donc impossible de calculer une activité volumique pour le radon dans l'eau de boisson qui soit d'application universelle.

A l'échelle mondiale, la dose moyenne absorbée par inhalation du radon de toutes origines est d'environ 1 mSv/année, ce qui est à peu près la moitié de l'exposition totale au rayonnement naturel. Par comparaison, la dose provenant de l'ingestion du radon présent dans l'eau de boisson est relativement faible. Toutefois, dans certaines situations particulières, les risques dus à l'inhalation et à l'ingestion peuvent être à peu près équivalents. Cela explique que l'ingestion ne puisse être considérée indépendamment de l'inhalation comme source d'exposition, d'autant plus que la présence de radon dans les habitations peut avoir d'autres origines.

Les autorités compétentes doivent évaluer tous ces facteurs à l'échelon régional ou national afin de déterminer si un niveau de référence de 0,1 mSv convient pour la région en question et fixer une activité volumique qui pourra servir de guide pour juger de la qualité de l'approvisionnement en eau. Ces jugements devront être fondés non seulement sur l'exposition par ingestion et inhalation du radon contenu dans l'eau, mais aussi sur l'exposition à d'autres sources de radon susceptible d'être inhalé. Dans ces circonstances, il semble nécessaire d'adopter une approche intégrée et d'évaluer les doses apportées par toutes les sources de radon, en vue notamment de déterminer les mesures optimales à appliquer si cela s'avère indispensable.