Guide méthodologique

Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives

(Annexes)

Version du 15 octobre 2010

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

asn AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

IRSN INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Liste des annexes

Annexe 1	FILIATION RADIOACTIVE- EQUILIBRE ET DESEQUILIBRE RADIOACITF	1
Annexe 2	FICHES RADIONUCLEIDES	1
Annexe 3	SOURCES D'INFORMATION UTILES	51
Annexe 4	PRINCIPAUX DOMAINES D'UTILISATION, ACTUELS OU PASSES, DE RADIONUCLEIDES	54
Annexe 5	QUESTIONNAIRE POUR L'ENQUETE DOCUMENTAIRE ET LA VISITE DE SITE	57
Annexe 6	MOYENS DE DETECTION DE LA RADIOACTIVITE	65
Annexe 7	LE PRELEVEMENT ET LA MESURE DES ECHANTILLONS	69
Annexe 8	EVALUATION QUANTITATIVE DES EXPOSITIONS RADIOLOGIQUES	86

Annexe 1 FILIATION RADIOACTIVE- EQUILIBRE ET DESEQUILIBRE RADIOACITF

FILIATIONS RADIOACTIVES

Tous les atomes d'une même espèce nucléaire, ou nucléide, possèdent le même nombre de protons et le même nombre de neutrons, et donc le même noyau. Les nucléides dont les atomes se transforment spontanément, car leurs noyaux sont instables, sont appelés radionucléides. L'atome instable se transforme en un atome moins instable moyennant une redistribution de l'énergie de liaison entre les différents nucléons (protons et neutrons) constitutifs du noyau de l'atome. Le réaménagement interne du noyau (appelé père) (i.e. phénomène de désintégration) conduit à un nouveau noyau (appelé fils) qui s'il est lui-même radioactif conduit à un nouveau noyau, et ainsi de suite jusqu'à aboutir à un noyau stable. Ces désintégrations successives caractérisent la filiation radioactive. Chaque réarrangement donne lieu à l'émission d'un rayonnement qui comporte la totalité de l'énergie rendue disponible par le réarrangement. Le rayonnement peut être sous forme particulaire (rayonnement α de noyaux d'hélium 4, ou rayonnement β d'électrons ou de positons) et/ou sous forme ondulatoire (rayonnement X ou γ de photons). Le phénomène de radioactivité se caractérise par l'énergie et les rayonnements émis, ainsi que par le taux de désintégration instantané, constant et noté λ (homogène à l'inverse d'un temps), dénommé usuellement constante radioactive. Si N0 est le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t = 0, alors le nombre N(t) de noyaux radioactifs présents à l'instant t est égal à :

$$N(t) = N_0.\exp(-\lambda t)$$

Deux autres notions s'en déduisent.

La période radioactive ou demi-vie, notée généralement T (homogène à un temps), est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux radioactifs présents à l'instant 0 se soient désintégrés, soit :

$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

L'activité d'un ensemble d'atomes à un instant t est la vitesse de désintégration à cet instant, soit :

$$A(t) = \lambda.N(t)$$

L'activité est une grandeur directement mesurable. Elle s'exprime en Becquerels (Bq) avec 1 Bq = 1 désintégration par seconde.

L'EQUILIBRE SECULAIRE

Lorsque la période du père est très nettement supérieure à celle des fils, les activités des différents fils se mettent à l'équilibre avec celle du père. Cet équilibre, dit séculaire, est obtenu après un temps égal à environ 10 fois la période du fils dont la période est la plus longue : ^{234}U (T=2,46.10^5 ans) pour la chaîne de l'^{238}U (T=4,47.10^9 ans) et ^{228}Ra (T=5,75 ans) pour la chaîne du ^{232}Th (T=1,40.10^{10} ans). En considérant que toutes les activités sont alors égales, l'erreur commise est inférieure à 1 ‰.

La figure 1 illustre le cas de la chaîne naturelle de filiation du ^{232}Th, pour un matériau contenant une activité massique de 50 Bq.g^{-1} de ^{232}Th.

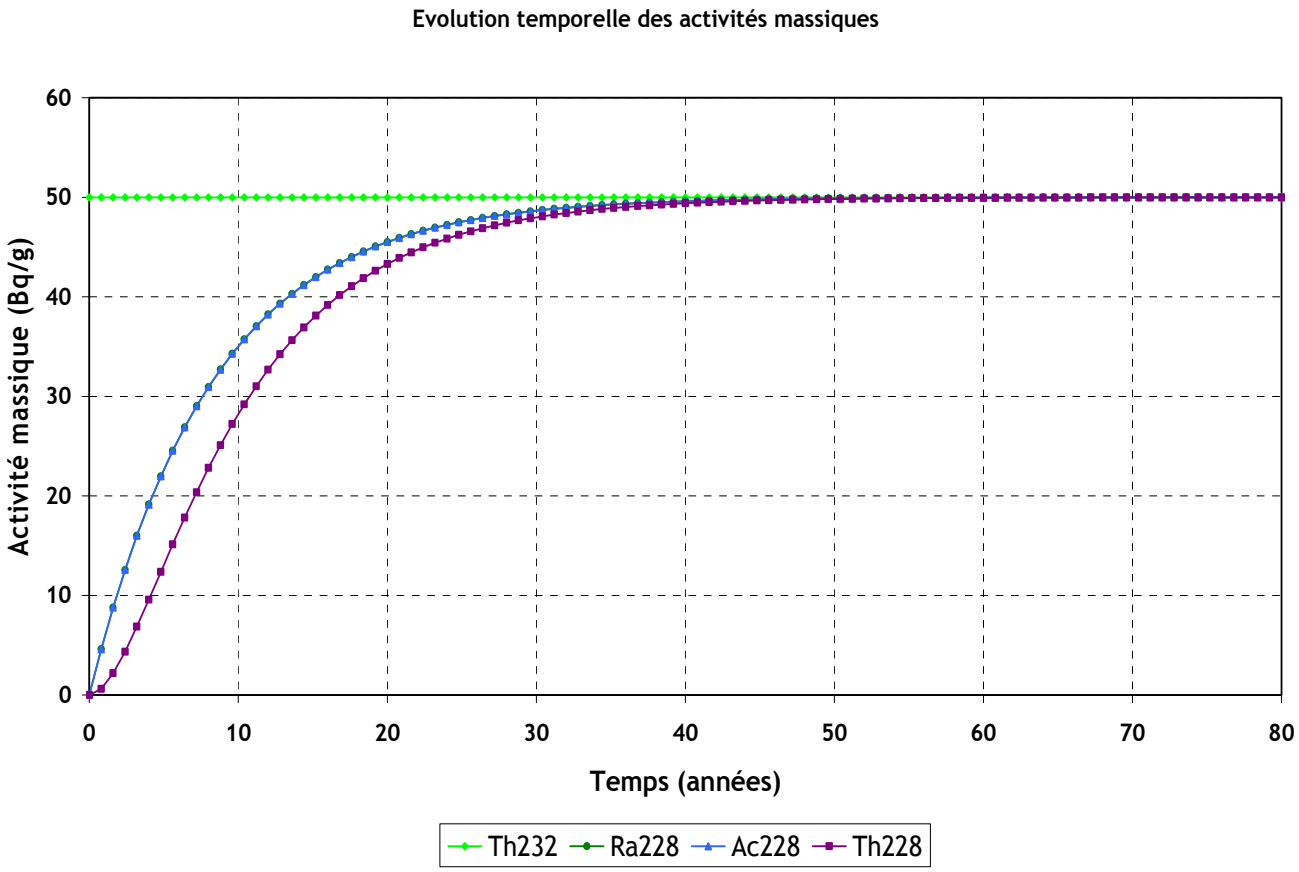


Figure 1 : Etablissement de l'équilibre séculaire dans le cas de la chaîne de filiation du ^{232}Th

La figure 2 illustre le cas de la chaîne naturelle de filiation de l'^{238}U, pour un matériau contenant une activité massique de 50 Bq.g^{-1} d'^{238}U.

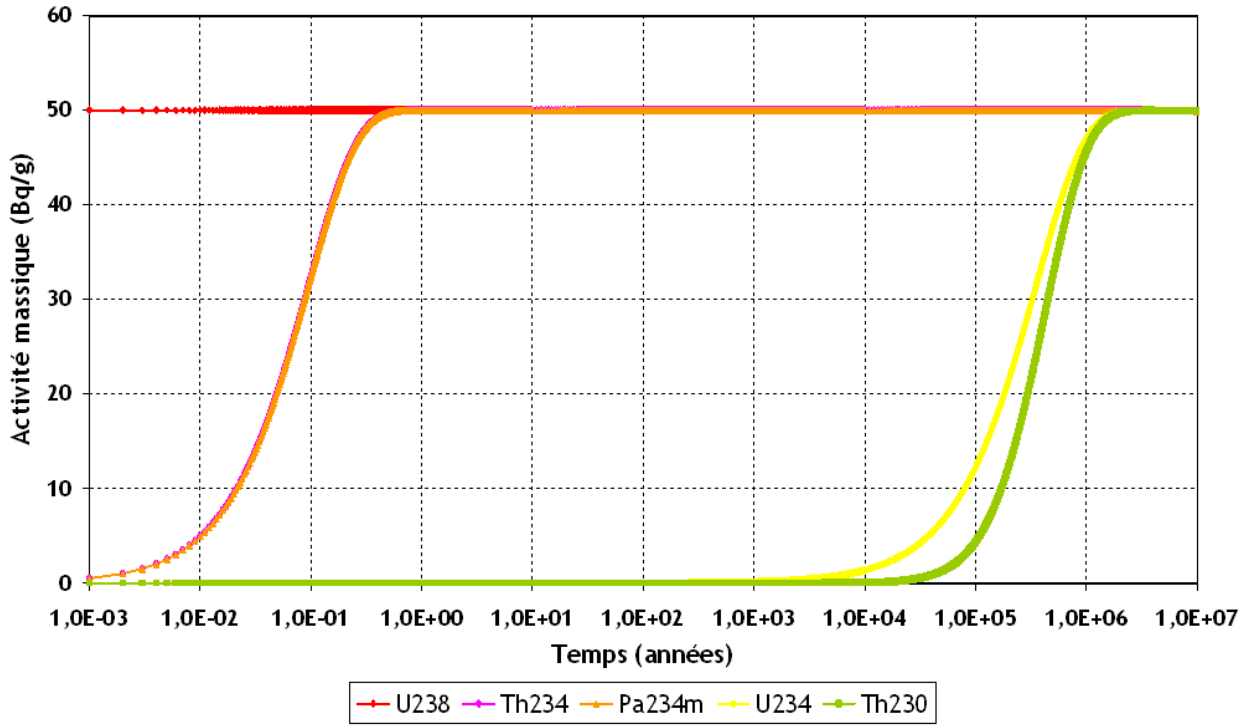


Figure 2 : Etablissement de l'équilibre séculaire dans le cas de la chaîne de filiation de l'^{238}U

La Directive européenne n°96/29 Euratom du Conseil du 13 mai 1996 indique les différents équilibres séculaires à considérer (cf. tableau 1) pour les évaluations dosimétriques portant sur la population et les travailleurs. Le tableau 1 présente, pour les radionucléides retenus dans ce guide, les équilibres à prendre en compte.

Tableau 1 : Equilibres séculaires à considérer

Père [1]	Radionucléides descendants en équilibre
$^{90}Sr+$	^{90}Y
$^{137}Cs+$	^{137m}Ba
$^{238}U+$	^{234}Th, ^{234m}Pa
$^{226}Ra+$	^{222}Rn, ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po
$^{210}Pb+$	^{210}Bi, ^{210}Po
$^{228}Ra+$	^{228}Ac
$^{228}Th+$	^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl, ^{212}Po
$^{228}Ra_{sec}$ [2]	^{222}Rn, ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po, ^{210}Pb, ^{210}Bi, ^{210}Po
$^{238}U_{sec}$	^{234}Th, ^{234m}Pa, ^{226}Ra, ^{222}Rn, ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po, ^{210}Pb, ^{210}Bi, ^{210}Po
$^{232}Th_{sec}$	^{228}Ra, ^{228}Ac, ^{228}Th, ^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl, ^{212}Po

[1] Le signe « + » utilisé dans les notations indique que le radionucléide représente aussi ses fils à vie courte, tandis que l'indice « sec » signale que le radionucléide représente également l'ensemble de ses fils à l'équilibre séculaire

[2] Le ^{226}Ra en équilibre séculaire avec ses descendants n'est pas considéré dans la Directive Euratom 96/29

Les radionucléides fils du ^{90}Sr (^{90}Y) et du ^{137}Cs (^{137m}Ba) sont toujours en équilibre avec leurs pères respectifs, quelle que soit la situation considérée.

Les figures 3 et 4 présentent les deux chaînes de filiation de l'^{238}U et du ^{232}Th.

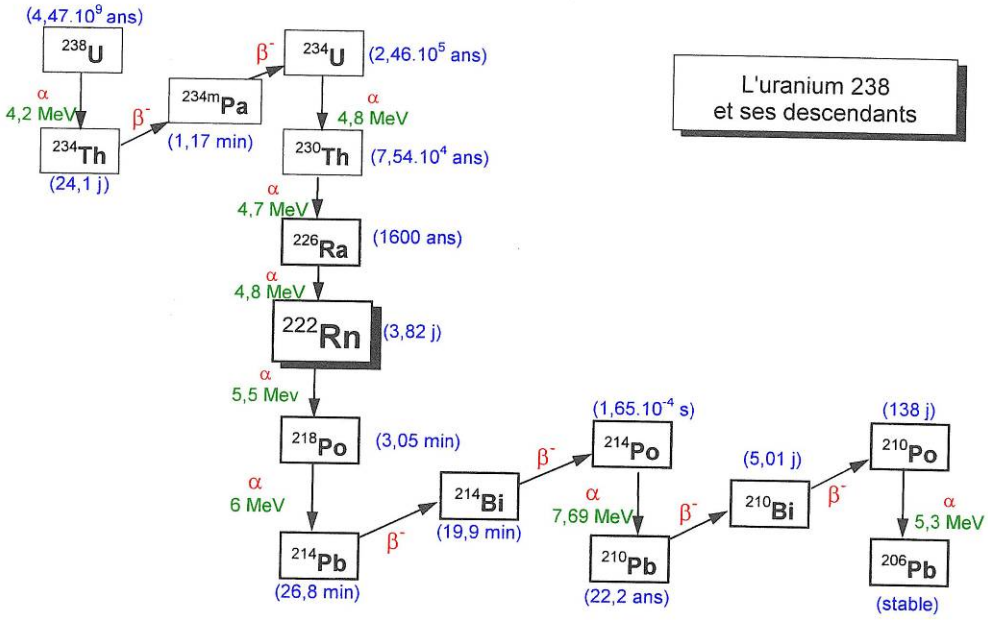


Figure 3 : Chaîne naturelle de filiation de l'^{238}U

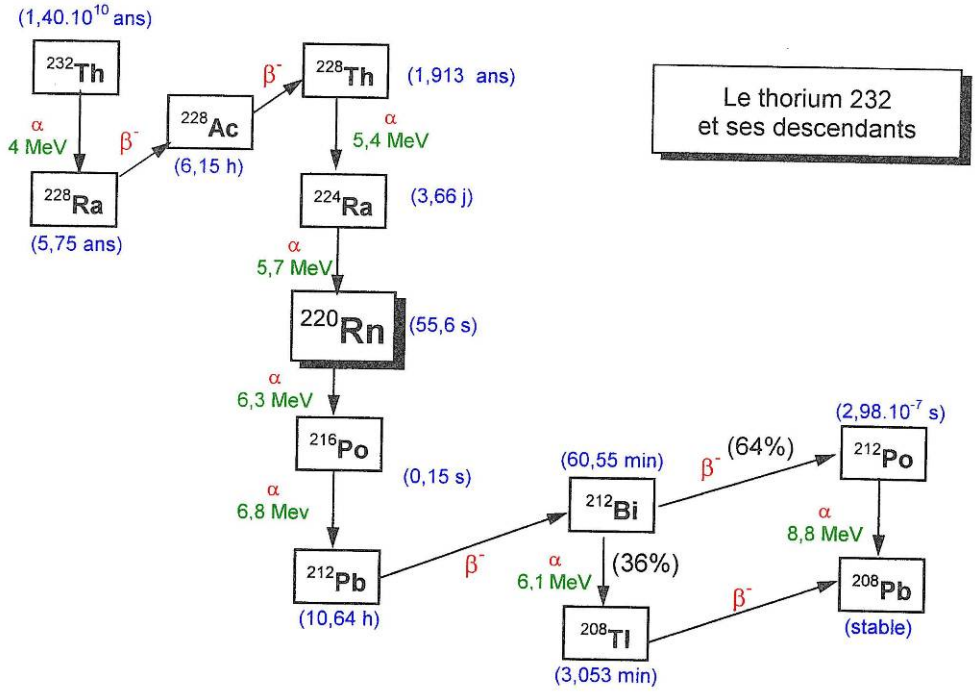


Figure 4 : Chaîne naturelle de filiation du ^{232}Th

4.4 Traitement de la filiation radioactive

L'yttrium 90 [T = 64 heures] et la baryum 137 métastable [T = 2,552 minutes], de par leur période faible d'une part devant celles de leur père respectifs, le strontium 90 [T = 29,12 ans] et le césium 137 [T = 30 ans], et d'autre part devant les ordres de grandeur [années ou dizaines d'années] des durées considérées dans la problématique des sites pollués sont toujours en équilibre séculaire avec leur père respectif, quelle que soit la situation considérée.

Lorsqu'un radioélément appartenant à une famille radioactive naturelle [chaînes du thorium 232 et de l'uranium 238] est détecté dans un sol pollué, il convient alors de considérer les radionucléides de la famille pour réaliser des évaluations quantitatives d'exposition radiologique.

Différents cas se présentent pour leur détermination.

4.4.1 Le précédé industriel à l'origine de la pollution est mécanique

Les différents radionucléides de la chaîne peuvent être considérés en équilibre séculaire avec le radionucléide père en tête de chaîne. Les activités de chacun des éléments de la chaîne sont égales. Il suffit donc de mesurer l'activité de l'un des radionucléides de la chaîne.

Toutefois, dans le cas de la contamination d'un sol ou de toute autre source non confinée par les éléments des chaînes de l'uranium 238 et du thorium 232, les radionucléides fils du radium 226 [le radon 222] et du radium 224 [le radon 220] sont sous forme gazeuse et donc susceptibles de s'exhaler. Un déséquilibre est ainsi introduit dans la chaîne entre le radium et ses descendants. Seule la mesure peut alors permettre de calculer le facteur de déséquilibre à retenir.

Exemple : mesure par spectrométrie γ

- Dans le cas du ^{222}Rn : le facteur de déséquilibre peut être calculé à partir de la mesure du ^{214}Bi à une date t et à une date t+ 40 jours [environ 10 fois la période du ^{222}Rn], l'échantillon de sol étant confiné entre les deux dates pour permettre la mise à l'équilibre séculaire des descendants du ^{226}Ra. Le facteur de déséquilibre sera le rapport entre le ^{214}Bi mesuré dans le sol à l'air libre à la date t et le ^{214}Bi mesuré à la date t+ 40 jours dans un échantillon confiné à la date t ;
- Dans le cas du ^{220}Rn : le facteur de déséquilibre peut être calculé à partir de la mesure du ^{224}Ra et du ^{212}Pb.

Le tableau III présente les radionucléides des chaînes de l'uranium 238 et du thorium 232 les plus facilement mesurables par spectrométrie γ ainsi que les caractéristiques des rayonnements associés [énergie et intensité des raies].

Tableau III : Emission γ des radionucléides des familles naturelles

Radionu-cléide	Période	Energie des principales raies γ en keV et [intensité, en %]
^{232}Th	1,405.10^{10} ans	Raies d'intensité faible
^{228}Ra	5,75 ans	**13,52 [1,6]**
^{228}Ac	6,13 heures	99,45 [1,3], 129,1 [2,8], 209,4 [4,4], 270,3 [3,6], 328 [3,2], 338,4 [11,5], 409,4 [21,1], 463 [4,5], 755,2 [1,05], 772,1 [1,6], 794,8 [4,6], 835,6 [1,8], **911,1 [27,8],** 946,6 [5,2], 968,9 [16,7], 1495,8 [1], 1587,9 [3,6], 1630,4 [1,9]
^{228}Th	1,913 an	**84,4 [1,22]**
^{224}Ra	3,66 jours	**241 [4,1]**
^{216}Po	0,15 seconde	Raies d'intensité faible
^{212}Pb	10,64 heures	**238,6 [43,5],** 300,1 [3,3]
^{212}Bi	60,55 minutes	39,9 [1,0], **727,3 [6,6],** 785,4 [1,1], 1620,7 [1,5]
^{212}Po	0,31.10^{-6} s	Raies d'intensité faible
^{208}Tl [**]	3,07 minutes	277,3 [6,4], 510,8 [22,8], **583,2 [85,1],** 763,1 [1,9], 860,7 [12,5]
^{238}U	4,468.10^{9} ans	**15 [8]**
^{234}Th	24,10 jours	**63,3 [4,5],** 92,4 [2,6], 92,8 [2,6]
^{234m}Pa	1,17 minute	Raies d'intensité faible
^{234}U	2,445.10^{5} ans	Raies d'intensité faible
^{230}Th	7,7.10^{4} ans	Raies d'intensité faible
^{226}Ra	1622 ans	11,6 [1,2], 186,2 [3,3]
^{218}Po	3,05 minutes	Raies d'intensité faible
^{214}Pb	26,8 minutes	53,2 [1,1], 74,8 [6,2], 77,1 [10,4], 86,8 [4,6], 242,0 [7,4], 295,2 [18,7], **351,9 [35,8],** 785,9 [1,1]
^{214}Bi	19,9 minutes	**609,3 [45],** 665,5 [1,6], 768,4 [4,8], 806,2 [1,2], 934,1 [3,1], 1120,3 [14,9], 1155,2 [1,7], 1238,1 [6,0], 1280,9 [1,5], 1377,7 [4,2], 1401,5 [1,4], 1408 [2,5], 1509,2 [2,1], 1661,1 [1,2], 1729,6 [3,1], 1764,5 [16,1], 1847,4 [2,1]
^{214}Po	164,3.10^{-6} s	Raies d'intensité faible
^{210}Pb	22,3 ans	**46,5 [4,1]**
^{210}Bi	5,012 jours	Raies d'intensité faible
^{210}Po	138,38 jours	Raies d'intensité faible

[**] La désintégration du ^{212}Bi en ^{208}Tl n'étant que partielle, il faut tenir compte du rapport d'embranchement [35,93 %] dans l'exploitation d'une mesure sur ce dernier radionucléide pour déduire l'activité de ses pères.

4.4.2 Le précédé industriel à l'origine de la pollution est chimique

L'équilibre séculaire est alors nécessairement perturbé.

Suivant l'âge de la pollution, différents cas doivent être distingués :

- **Si l'activité industrielle d'extraction du radionucléide à vie longue [père] a cessé depuis une durée supérieure à 10 fois la période de son descendant présentant la période la plus longue dans la chaîne de filiation, alors l'équilibre séculaire est rétabli entre le père et ses descendants.** L'activité de chacun des radionucléides de la chaîne est alors égale à l'activité résiduelle du radionucléide père extrait.

  La figure 5 illustre l'exemple de la famille du thorium 232. Il est supposé ici que, lors d'une pratique industrielle, le thorium [supposé en équilibre séculaire avec ses descendants] est extrait chimiquement d'un matériau naturel avec une activité massique égale à 50 $Bq.g^{-1}$, avec un rendement de 80 %.

  Cette extraction n'ayant pas d'influence sur les rapports isotopiques du thorium, on note une diminution de l'activité en thorium 232 et en thorium 228 du fait du processus industriel, qui descend alors à 10 $Bq.g^{-1}$.

  Dans les résidus d'extraction, l'équilibre séculaire est rétabli au bout de 60 ans environ, soit 10 périodes du radium 228. Avant cette durée, seul l'actinium 228 reste en équilibre avec son père, le radium 228.

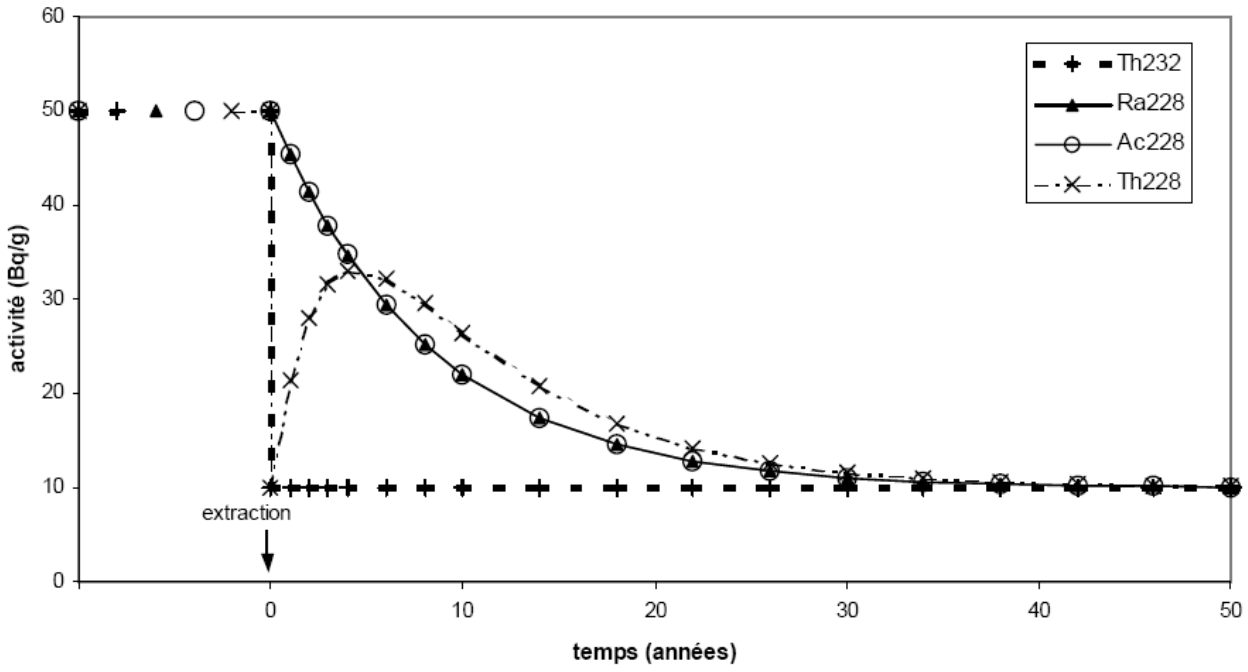


Figure 5 : Exemple de déséquilibre

Dans le cas des deux chaînes naturelles de l'uranium 238 et du thorium 232, la détermination de l'activité des différents radionucléides des deux chaînes doit être effectuée en prenant soin de considérer les éventuels facteurs de déséquilibre liés à l'exhalation du radon.

- **Si l'activité industrielle est plus récente ou si l'un des radionucléides fils a une période très longue, l'équilibre séculaire n'est pas rétabli.** La détermination de l'activité des radionucléides présents passe par la définition de sous-ensembles constitués des radionucléides à période courte [quelques jours au maximum en équilibre avec leurs pères à vie longue [période de l'ordre de l'année]. Le tableau IV présente les différents sous-ensembles à retenir pour les deux familles naturelles [uranium 238 — dite famille de l'uranium, thorium 232 — dite famille du thorium] considérées dans le guide.

Tableau IV : Equilibres séculaires au sein des familles du thorium 232 et de l'uranium 238

Père	Radionucléides à vie courte en équilibre
^{238}U	^{234}Th, ^{234m}Pa
^{234}U	
^{230}Th	
^{226}Ra	^{222}Rn, ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po
^{210}Pb	^{210}Bi
^{210}Po	
^{232}Th	
^{228}Ra	^{228}Ac
^{228}Th	^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl, ^{212}Po

Pour caractériser entièrement une famille radioactive, il convient alors de mesurer au moins un élément de chacun des équilibres séculaires listés dans le tableau ci-dessus, pour la famille considérée, et de mesurer directement les radionucléides isolés [uranium 234, thorium 230, polonium 210 et thorium 232].

4.4.3 Application

- Cas des radionucléides mesurables par spectrométrie γ

Le tableau V présente les possibilités de mesure des différents radionucléides des deux familles par spectrométrie γ.

Tableau V : Radionucléides des familles naturelles mesurables par spectrométrie γ

Elément recherché	Elément mesurable	Commentaire
^{238}U	^{234}Th	
^{234}U	non mesurable	
^{230}Th	non mesurable	
^{226}Ra	^{226}Ra, ^{214}Pb et ^{214}Bi	Le facteur de déséquilibre est calculé à partir de deux mesures séparées de 10 fois la période du ^{222}Rn, soit 40 jours.
^{210}Pb	^{210}Pb	
^{210}Po	non mesurable	
^{232}Th	non mesurable	
^{228}Ra	^{228}Ac	
^{228}Th	^{224}Ra et ^{212}Pb	La mesure de ces deux radionucléides fournit l'activité du radium et le facteur de déséquilibre éventuel lié au radon 220.

➢ Cas des radionucléides non mesurables par spectrométrie γ

^{234}U

Il peut être considéré en équilibre avec l'uranium 238, du fait de son appartenance à la même espèce chimique.

^{232}Th

Sa détermination nécessite une méthode de mesure nucléaire plus poussée [spectrométrie α, spectrométrie de masse,…]. Son activité peut également être obtenue par un dosage chimique du thorium naturel, connaissant l'abondance naturelle[3] de cet isotope [proche de 100 %] et son activité spécifique [exprimée en Becquerels par gramme de thorium naturel].

^{230}Th

Différents cas se présentent :

- si l'activité industrielle ayant induit le déséquilibre portait sur l'uranium, on suppose qu'avant l'extraction, toute la chaîne était en équilibre séculaire. La mesure du ^{226}Ra, radionucléide de période longue [1622 ans] fournit alors un bon indicateur de l'activité initiale des éléments de la chaîne [à plus de 98 % si l'activité a cessé depuis moins de 50 ans]. L'activité du thorium 230 peut être considérée égale à celle du radium 226 ;
- si l'extraction portait sur le radium, le thorium 230 peut être considéré en équilibre avec l'uranium 238 et donc leurs activités peuvent être considérées égales ;
- si l'extraction portait sur le thorium, les méthodes traditionnelles ne permettent pas de mesurer ou de déduire l'activité à partir d'un dosage de l'activité du thorium 230. Il faut

[3] L'abondance naturelle d'un isotope d'un élément chimique correspond à la proportion relative de cet isotope dans les matériaux naturels par rapport aux autres isotopes du même élément

alors mettre en œuvre des techniques plus poussées ou adopter une hypothèse très conservatrice d'équilibre avec l'^{238}U.

Annexe 2 FICHES RADIONUCLEIDES

Fiche radionucléide **Aspects médicaux et sanitaires**

$^{3}_{1}H$

1.1 TRITIUM

I. CARACTERISTIQUES

I.1 CHIMIQUES

L'hydrogène a trois isotopes : l'hydrogène léger (constitué d'un proton) qui est le plus abondant, le deutérium et le tritium. Ce dernier est l'isotope radioactif, constitué d'un proton et de deux neutrons, représenté par ^{3}H ou T. Découvert en 1934 par Rutherford et identifié par Alvarez en 1937, ses propriétés chimiques sont identiques à celles de l'hydrogène. Le tritium existe sous trois formes chimiques :

- **Eau tritiée (HTO)**

  Légèrement plus lourde que l'eau légère H_2O, c'est la forme la plus abondante du tritium dans le milieu naturel et les espèces vivantes. La différence de masse entre les composés H et T se manifeste dans les processus naturels de changement de phase tels que l'évaporation, la condensation ou la solidification, et entraîne un faible enrichissement du tritium par rapport à l'hydrogène léger dans la phase condensée.

- **Tritum gazeux (HT**)

  Cette forme pourrait prendre de l'importance avec le développement des recherches sur la production d'énergie par fusion nucléaire.

- **Tritium organique (OBT)**

  Une partie du tritium minéral entre dans les molécules organiques par échange avec un hydrogène labile ou par des réactions métaboliques. Ce phénomène se produit aussi bien pour les végétaux, par la photosynthèse, que chez l'homme et l'animal.

I.2 NUCLEAIRES

Période radioactive		12,3 ans
Activité massique	-Eau tritiée HTO	$5{,}4.10^{13}$ Bq.g^{-1}
	- Tritium gaz HT	$3{,}7.10^{14}$ Bq.g^{-1}
Poids du Becquerel	- Eau tritiée HTO	$1{,}85.10^{-14}$ g.Bq^{-1}
	- Tritium gaz HT	$2{,}7.10^{-15}$ g.Bq^{-1}
Une émission		100% désintégration β^- (Emax = 19 keV)

[Voir Base de données « Nucléides », 1999]

II. ORIGINE

La quantité de tritium présente dans le monde a fortement augmenté avec le développement de l'utilisation de l'énergie nucléaire, et surtout en raison des essais d'armes thermonucléaires dans l'atmosphère. Un retour

à la situation antérieure aux essais est en cours. La décroissance radioactive a fait disparaître près de 90 % des masses de tritium créées artificiellement dans l'environnement entre 1945 et la fin des années soixante.

II.1 NATURELLE

Bien que sa période radioactive soit courte, le tritium est présent en permanence à l'état naturel dans l'environnement. Il provient pour l'essentiel de l'action des rayonnements cosmiques sur l'azote, l'oxygène et l'argon de l'air. Environ 99 % du tritium ainsi produit, se transforme en eau tritiée et s'intègre au cycle normal de l'eau (pluie, cours d'eau, océan, évaporation...). Il a été estimé (UNSCEAR, 1993) que l'inventaire global du tritium naturel est d'environ $1{,}3.10^{18}$ Bq, ce qui correspond à une production annuelle de $7{,}4.10^{16}$ Bq. La production tellurique est difficile à estimer avec exactitude, mais il semble qu'elle soit très petite devant la production atmosphérique.

II.2 ARTIFICIELLE

- **Explosions nucléaires atmosphériques**

Les essais militaires ont disséminé jusqu'en 1970 une quantité de tritium estimée à $2{,}4.10^{20}$ Bq. L'inventaire du tritium dans les océans en 1972 atteignait $6{,}3.10^{19}$ Bq. Actuellement, son accumulation dans l'environnement (principalement dans les océans) est estimée à environ $4{,}3.10^{19}$ Bq (UNSCEAR, 1993).

- **Fabrication des armes thermonucléaires**

Le tritium est nécessaire à la fabrication des armes thermonucléaires. Pour le centre CEA de Valduc, les rejets gazeux de tritium en 1999 se sont élevés à $2{,}67.10^{14}$ Bq avec une répartition HTO/HT de l'ordre de 70/30.

- **Emissions par les réacteurs nucléaires**

Le tritium est formé comme produit de fission ternaire de certains isotopes de l'uranium et du plutonium et par des réactions neutroniques sur des éléments légers du circuit primaire (bore, lithium). Dans les réacteurs à eau légère (les plus répandus), le tritium de fission reste en grande partie dans le combustible lui-même (environ 87 %), ainsi que dans les gaines de zircaloy des crayons d'éléments combustibles où il se trouve sous forme d'hydrure de zirconium (environ 13 %). Le dégagement du tritium dans l'eau du circuit primaire est minime, sinon négligeable. Il se produit seulement en cas de défauts dans les gaines de zircaloy (ce qui est peu fréquent), de sorte que le relâchement du tritium de fission au cours du fonctionnement du réacteur se limite à 0,1-1% du tritium ainsi produit. De 1985 à 1989, les centrales électronucléaires ont rejeté en moyenne $5{,}64.10^{15}$ Bq de tritium gazeux et $7{,}5.10^{15}$ Bq d'eau tritiée par an (UNSCEAR, 1993).

- **Rejets par les usines de retraitement de combustibles irradiés**

Le tritium de fission est libéré pour la plus grande part lorsque le combustible usé est mis en solution pour être retraité. De 1985 à 1989, au cours du retraitement des 4 % du combustible nucléaire mondial, les usines ont rejeté $2{,}6.10^{14}$ Bq par an de tritium gazeux dans l'atmosphère et principalement, $4{,}37.10^{15}$ Bq d'eau tritiée par an dans le milieu marin (UNSCEAR, 1993). Pour l'usine de la Hague en 1999, les rejets gazeux de tritium se sont élevés à 8.10^{13} Bq et les rejets liquides à $1{,}3.10^{16}$ Bq. Pour l'usine de Sellafield (GB) en 1996, les rejets gazeux de tritium se sont élevés à $5{,}3.10^{14}$ Bq et les rejets liquides à 3.10^{15} Bq (Annual Report on Radioactive discharges and monitoring of the environment 1996, BNFL, 1996)

III. UTILISATIONS INDUSTRIELLES ET MEDICALES

Le tritium est utilisé :

- pour la fabrication de peintures luminescentes en remplacement du radium ;
- pour le marquage de molécules dans les études de métabolisme de certaines substances, en biologie ou pharmacie ;
- comme traceur dans l'eau de la géosphère et la biosphère ;
- comme test de l'étanchéité des cavités de stockage souterrain ;
- dans les générateurs de neutrons 14 MeV où des cibles de ^{3}H sont bombardées par des deutons (^{2}H).

IV. TRANSFERT A L'ENVIRONNEMENT

Comme isotope de l'hydrogène, le tritium participe au cycle de cet élément dans l'environnement naturel. Il peut être présent dans toutes les molécules hydrogénées, être associé aussi bien à l'eau tissulaire qu'à la matière organique des végétaux et des aliments qui en dérivent. C'est un radionucléide qui sous forme d'eau tritiée est très mobile et de ce fait rapidement intégré dans de nombreux cycles de la géosphère et de la biosphère. En situation d'équilibre vrai, il ne semble pas s'accumuler préférentiellement dans tel ou tel composant environnemental ou biologique [Belot et al., 1996].

V. METROLOGIE ENVIRONNEMENTALE

Foulquier et al. (1998, p 80-81) proposent des méthodes de mesure dans l'environnement.
Dans l'eau, le comptage est directement réalisé sur des échantillons filtrés. Le résultat est exprimé en $Bq.l^{-1}$.
Les échantillons de lait sont séparés en deux parties. La première (environ 700 ml) est distillée à 100 °C. La mesure du tritium libre est effectuée sur le distillat. La seconde partie de l'échantillon est desséchée à 105 °C. La « pâte » récupérée subit une préparation destinée à la mesure du tritium « non labile », lié à la matière organique. Pour l'eau du lait, obtenue par distillation, le résultat obtenu s'exprime directement en $Bq.l^{-1}$. D'un point de vue quantitatif, le tritium libre est prépondérant par rapport à celui qui est lié à la matière organique.

Les échantillons de sols, de boues de décantation, de sédiments, de végétaux aquatiques et terrestres, de vin et de poissons subissent également une préparation qui consiste en :

- un séchage à 105 °C, pendant une semaine environ, afin d'éliminer le tritium libre des échantillons ;
- un séchage à 105 °C, pendant 10 jours sous une atmosphère exempte de tritium, afin d'éliminer le tritium « labile » lié à la matière organique ;
- une combustion à 900 °C, sous flux d'oxygène, afin de recueillir le tritium « non labile » lié à la matière organique. Le liquide recueilli est appelé « eau de combustion ».

Les échantillons de 10 ml d'eau brute, d'eau du lait ou d'eau de combustion sont mélangés à 10 ml d'Instagel, liquide scintillant. Ils sont ensuite analysés par scintillation liquide à l'aide d'un compteur adapté aux comptages de très faibles activités selon la méthode décrite par Belot et al. (1996). La mesure peut être

effectuée pendant 300 minutes pour obtenir une sensibilité de 10 $Bq.l^{-1}$, 1 000 minutes pour obtenir une sensibilité de 3 $Bq.l^{-1}$ ou 2 000 minutes pour obtenir une sensibilité de 1 $Bq.l^{-1}$ d'eau.

La teneur en tritium « non labile » lié à la matière organique peut s'exprimer de quatre manières différentes :

- en $Bq.l^{-1}$ d'eau de combustion, qui correspond au résultat initial de la mesure et peut permettre d'exprimer la teneur
- en $Bq.kg^{-1}$ de matière sèche ; elle est relative à la quantité de matière sèche de l'échantillon analysé, obtenue par pesée avant combustion ;
- en $Bq.kg^{-1}$ de matière organique ; elle est relative à la quantité de matière organique de l'échantillon analysé, obtenue par pesée après combustion ;
- en $Bq.g^{-1}$ d'hydrogène (OBT) ; cette expression fait référence à la quantité d'hydrogène présente dans l'échantillon.

VI. EXPOSITION EXTERNE

Les coefficients de dose efficace sont issus du rapport n°12 du Federal Guidance (1993), et sont valables quel que soit l'âge de l'individu exposé.

	Dose efficace
Panache	$3{,}31.10^{-19}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)
Dépôt	-
Immersion dans l'eau	-

VII. CONTAMINATION EXTERNE DE LA PEAU

Une partie du ^3H peut être absorbée à travers la peau et cette voie de contamination accompagne souvent l'inhalation. Pour une concentration dans l'air ambiant de 1 $Bq.m^{-3}$, la vitesse de pénétration dans l'organisme à travers la peau est de 10^{-2} $Bq.mn^{-1}$.

VIII. EXPOSITION INTERNE

VIII.1 BIOCINETIQUE

Le passage du ^3H dans le sang et son transfert à l'organisme dépendent de la forme de dépôt.

- **Ingestion**

L'eau tritiée (HTO) et les molécules organiques marquées au tritium (OBT) peuvent être ingérées lors de l'absorption d'aliments et d'eau contaminés au tritium, ou accidentellement lors de manipulations expérimentales. Leur absorption est complète ; la totalité de la quantité ingérée franchit la barrière gastro-intestinale et passe dans le sang.

- **Inhalation**

Le tritium gaz (HT), l'eau tritiée (HTO) et, dans une certaine mesure, les composés tritiés organiques peuvent être inhalés sous forme de gaz. Lorsqu'il est inhalé, une très faible partie du tritium gazeux (environ un millième) est absorbée puis oxydée en eau tritiée.

- **Rétention - Elimination**

Le modèle biocinétique pour l'eau tritiée et les composés organiques du tritium est décrit pour le travailleur, dans la publication CIPR 56. Il suppose que 97% de l'eau tritiée est en équilibre avec l'eau du corps et est retenu avec une demi-vie de 10 jours, et que le restant est incorporé dans les molécules organiques et retenu avec une demi-vie de 40 jours. Pour les composés organiques du tritium, 50% de l'activité est retenu avec la période biologique de l'eau libre (10 jours) et 50% avec la période biologique du carbone organique (40 jours).

[Pour plus de renseignements : voir logiciel « Calliope », 1999]

VIII.2 RADIOTOXICITE

Groupe de radiotoxicité : 4 (faible)
(décret du 88-521 du 18/04/88)

Le risque d'exposition au tritium est lié à la contamination interne.

VIII.3 MESURE

Dans la plupart des programmes de surveillance du tritium, les échantillons urinaires ne sont pas recueillis sur 24 heures comme pour les autres éléments. Si on suppose que l'activité urinaire de l'eau tritiée est en équilibre avec l'activité de l'eau du corps, les résultats de l'analyse d'eau tritiée sur un simple échantillon urinaire sont ceux de l'activité de l'eau corporelle au moment du prélèvement. Pour cette raison, les résultats d'activité urinaire en eau tritiée sont exprimés en $Bq.l^{-1}$ plutôt qu'en Bq par 24 heures.

Tritium	Méthode de mesure		Limite de détection
	Comptage par scintillation liquide	Urine	100 $Bq.l^{-1}$

VIII.4 COEFFICIENTS DE DOSE

Pour le public, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** pour l'adulte et jusqu'à l'âge de **70 ans** pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de **0,9 $m^3.h^{-1}$** et de **0,2 $m^3.h^{-1}$**.

		Dose efficace (Sv/Bq)	
		Adulte	**Enfant (1-2 ans)**
Inhalation	-Eau tritiée HTO	$1{,}8.10^{-11}$	$4{,}8.10^{-11}$
	-Tritium organique OBT (type M) AMAD = 1 µm	$4{,}1.10^{-11}$	$1{,}1.10^{-10}$
	-Tritium gazeux HT	$1{,}8.10^{-15}$	$4{,}8.10^{-15}$
	-Méthane tritié CH_3T	$1{,}8.10^{-13}$	$4{,}8.10^{-13}$
Ingestion	-Eau tritiée HTO	$1{,}8.10^{-11}$	$4{,}8.10^{-11}$
	-Tritium organique OBT	$4{,}2.10^{-11}$	$1{,}2.10^{-10}$

Pour le travailleur, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** et un débit respiratoire moyen égal à **1,2 $m^3.h^{-1}$**.

		Dose efficace (Sv/Bq)
		Travailleur
Inhalation	-Eau tritiée HTO	$1{,}8.10^{-11}$
	-Tritium organique OBT (type M) AMAD = 1 µm	$4{,}1.10^{-11}$
	-Tritium gazeux HT	$1{,}8.10^{-15}$
	-Méthane tritié CH_3T	$1{,}8.10^{-13}$
Ingestion	-Eau tritiée HTO	$1{,}8.10^{-11}$
	-Tritium organique OBT	$4{,}2.10^{-11}$

IX. PROTECTION DES TRAVAILLEURS

IX.1 INDIVIDUELLE

Du fait de l'absorption de la vapeur d'eau tritiée par la peau (respiration transcutanée), le seul port d'un masque même isolant (adduction d'air respiratoire) ne suffit pas à assurer une protection valable. Il convient donc de protéger le corps entier en utilisant un vêtement « imperméable au tritium ». Néanmoins, il convient de prêter attention au fait qu'un travail en scaphandre est beaucoup plus long et qu'il nécessite de plus un stationnement prolongé dans le sas de sortie pour assurer une décroissance suffisante de la contamination atmosphérique et surfacique extérieure grâce à un balayage d'air important.

IX.2 COLLECTIVE

Dans des locaux, il est choisi de confiner le tritium (confinement statique par étanchéité des appareils et confinement dynamique grâce à la ventilation). Le taux de renouvellement horaire dans les locaux doit être important (20 à 40 renouvellements par heure), car le tritium gazeux diffuse extrêmement rapidement dans l'atmosphère. La vitesse de l'air dans le procédé (caisson par exemple) ou dans les hottes où le tritium est manipulé doit être de 1,5 $m.s^{-1}$ pour éviter toute rétrodiffusion.

X. ACCIDENT

X.1 REPONSE MEDICALE

En cas de contamination de la peau : décontaminer par lavage avec des produits non abrasifs, non corrosifs, non toxiques et si possible adaptés à la forme chimique du radionucléide. En cas de contamination interne : procéder au recueil immédiat des urines et ce pendant 24 heures.

Il n'existe pas de protocole établi mais des recommandations en cas de contamination importante avec de l'eau tritiée. Le but est, d'une part de réduire l'absorption intestinale du tritium au moyen d'une bonne hydratation du patient, d'autre part de stimuler l'excrétion urinaire à l'aide d'un diurétique d'effet rapide, l'objectif étant une diurèse de 500 ml/h, tout en surveillant le sodium et le potassium pour éviter une intoxication par l'eau. En fait, dans la plupart des cas, la dilution isotopique obtenue par absorption de boisson paraît suffisante puisqu'elle fait passer la période biologique de 10-12 jours à 3-4 jours pour une consommation supplémentaire de 3 à 4 litres par jour. Le contrôle s'effectue de façon journalière sur des échantillons d'urine (NCRP Report n° 65, 1980).

Les brûlures cutanées doivent être traitées comme des brûlures classiques.

X.2 REPONSE SANITAIRE

Pour les eaux de boisson, les recommandations de l'OMS (1993) préconisent une limite de 7800 $Bq.l^{-1}$. La directive européenne 98/83/CE du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, propose une concentration de tritium égale à 100 $Bq.l^{-1}$ à des fins de contrôle. En cas de non respect, les autorités sanitaires examinent s'il existe un risque pour la santé des personnes ; si oui, elles définissent les mesures à prendre en matière de restriction ou d'interdiction de consommation.

XI. TEXTES REGLEMENTAIRES GENERAUX

- Les limites annuelles de dose de la Directive Européenne n°96/29/EURATOM du 13 mai 1996 sont les suivantes :

	Public	**Travailleur**
Dose efficace	1 mSv	100 mSv/ 5 ans consécutifs et au plus 50 mSv/an
Dose équivalente à la peau	50 mSv	500 mSv

- Brochure du Journal Officiel (J.O.) n°1420 : protection contre les rayonnements ionisants. Ce document rassemble tous les textes législatifs et réglementaires de radioprotection et notamment :
  - Le décret n° 88-521 du 18 avril 1988 modifiant le décret du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de radioprotection ;
  - Le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 modifié relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants et ses textes d'application.

- Directive Européenne n°96/29/EURATOM adoptée le 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.

XII. BIBLIOGRAPHIE

- BELOT Y., ROY M., METIVIER H., Le TRITIUM de l'environnement à l'Homme, Editions de Physique, Paris, 1996.
- Calliope, CD-Rom, Collection IPSN, 1999.
- DELACROIX D., GUERRE J.P., LEBLANC P., Radionucléides et Radioprotection, Saclay, CEA, Paris, 1994.
- Federal Guidance Report n°12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. Oak Ridge National Laboratory, 1993.
- FOULQUIER L., BRETHEAU F., Les Installations Nucléaires et l'Environnement, Editions de Physique, Paris, 1998.
- GALLE P., Toxiques nucléaires, Paris, Masson (2e édition), 1997.
- Nucléides, CD-Rom, Collection CEA, 1999.
- NCRP, Management of persons accidentally contamined with radionuclides, Report n°65, 1980, revu en1993.
- OECD/NEA, Radiological significance and management of TRITIUM, CARBON 14, KRYPTON 85, IODINE 129 arising from the nuclear fuel cycle, Paris, 1980.
- OMS, Guidelines for drinking water quality, WHO, Genève (2e édition), vol. 1, 1993.
- OPRI/INRS, Tritium : Fiche technique de radioprotection pour l'utilisation de radionucléides en sources scellées, 1996.
- NCRP, Tritium in the environment, National Council on Radiation Protection and measurements, Report n° 62, Washington, 1979.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, New York, United Nations, 1993.

Rédacteurs de la Fiche : P. Bérard, B. Le Guen, M.L. Perrin, E. Gaillard-Lecanu, V. Chambrette, J. Brenot (DPHD)

Vérificateur : A. Desprès (DPHD)

Fiche radionucléide **Aspects médicaux et sanitaires**

$^{14}_{6}C$

1.2 CARBONE 14

I. CARACTERISTIQUES

I.1 CHIMIQUES

Le ^{14}C est un des isotopes radioactifs du carbone. Les isotopes stables du carbone sont le carbone 12 et le carbone 13 qui représentent respectivement 98,9 % et 1,1 % du carbone total, le carbone 14 n'étant qu'à l'état de trace. Les formes chimiques du ^{14}C varient suivant le mode de production. Dans l'environnement, il existe sous deux formes principales :

- à l'état de CO_2, il se comporte comme le gaz carbonique stable, c'est-à-dire qu'il peut rester sous forme de gaz dans l'air, et se transforme en bicarbonate et carbonate dans l'eau ;
- au cours de la photosynthèse, le CO_2 est incorporé dans la matière organique dont il constitue le squelette carboné. Il y a donc rapidement équilibre entre l'activité spécifique du carbone atmosphérique et celle de la matière organique végétale en cours de fabrication.

Le ^{14}C peut exister sous d'autres formes. Ainsi, dans les réacteurs à eau bouillante, le ^{14}C est à 95 % sous forme de CO_2, à 2,5 % de monoxyde de carbone CO et à 2,5 % d'hydrocarbure. Dans les réacteurs à eau pressurisée, 70 à 90 % du ^{14}C dégagé se trouve sous forme de CH_4, C_2H_6 et CO_2.

I.2 NUCLEAIRES

Période radioactive	5 730 ans
Activité massique	$1{,}65.10^{11}$ Bq.g^{-1}
Poids du Becquerel	$6{,}06.10^{-12}$ g.Bq^{-1}
Une émission	100 % désintégration β^- (Emax = 156 keV)

[Voir Base de données « Nucléides », 1999]

II. ORIGINE

II.1 NATURELLE

Le ^{14}C naturel résulte de l'action des neutrons cosmiques sur les atomes d'azote dans la stratosphère et dans la partie supérieure de la troposphère. Les différentes estimations indiquent que le taux de production annuelle est compris entre 10^{15} et $1{,}4.10^{15}$ Bq. La variation de l'intensité des rayonnements cosmiques entraîne une fluctuation de la production. Cette fluctuation est due à divers éléments qui ne sont pas encore très bien connus, mais principalement au cycle solaire de 11 ans et à plus grande échelle temporelle, aux variations du champ magnétique terrestre qui joue un rôle de bouclier à l'égard des rayonnements cosmiques.

II.2 ARTIFICIELLE

- **Explosions nucléaires atmosphériques**

Lors des explosions nucléaires, les neutrons émis interagissent avec l'azote de l'atmosphère pour former du carbone. Les explosions nucléaires ont introduit dans l'atmosphère environ $2{,}1.10^{17}$ Bq de ^{14}C.

Emissions par les réacteurs nucléaires

Dans les réacteurs nucléaires, la production de ^{14}C provient de plusieurs réactions dans le combustible, les matériaux de structure du cœur et le modérateur. Un réacteur à eau légère de 1000 MWe génère environ 10^{12} $Bq.an^{-1}$ de ^{14}C. Il en rejette annuellement de l'ordre de 4.10^{11} Bq, principalement sous forme organique (CH_4). Le reste est rejeté lors du retraitement ou reste piégé dans les gaines du combustible pour être stocké ultérieurement à l'état de déchets solides.

- **Rejets par les usines de retraitement des combustibles irradiés**

Le ^{14}C des combustibles nucléaires usés est libéré lors de l'étape de dissolution dans les usines de retraitement. Selon le mode d'exploitation, ces rejets se feront de manière continue ou discontinue. Dans les usines de retraitement utilisant le procédé PUREX (par exemple à La Hague), le ^{14}C serait libéré principalement sous forme de CO_2 . L'augmentation à partir du début des années 90 des rejets annuels gazeux de ^{14}C par l'usine de La Hague correspond au démarrage des usines UP3 et UP2-800. Ces rejets ont été estimés à $1{,}87.10^{13}$ Bq en 1999. Les rejets liquides de l'usine de La Hague en 1999 ont été de $9{,}9.10^{12}$ Bq. Pour l'usine de Sellafield (Royaume-Uni) en 1996, les rejets gazeux de ^{14}C se sont élevés à $6{,}3.10^{11}$ Bq et les rejets liquides à $1{,}1.10^{13}$ Bq [Annual Report on Radioactive discharges and monitoring of the environment 1996, BNFL, 1996].

- **Production par des sources diverses (médicales, industrielles, recherche)**

On considère qu'à terme, l'intégralité du ^{14}C utilisé pour le marquage des molécules sera rejeté dans l'atmosphère sous forme de CO_2. L'UNSCEAR estime à 3.10^{10} Bq la production annuelle de ^{14}C par million d'habitants dans les pays développés (5.10^{13} Bq pour l'ensemble du monde). Cette estimation est basée sur les résultats d'une étude américaine de 1978. Une estimation britannique de 1987 conduisait à des valeurs au moins deux fois supérieures.

III. UTILISATIONS INDUSTRIELLES ET MEDICALES

Le ^{14}C est utilisé pour le marquage des molécules en médecine, pharmacie et biologie.

IV. TRANSFERT A L'ENVIRONNEMENT

L'activité des milieux en ^{14}C est couramment exprimée en Bq de ^{14}C par kg de carbone stable. Comme tous les isotopes du carbone ont, du point de vue des transferts dans l'environnement, le même comportement, ce rapport est en toute rigueur identique quel que soit le milieu considéré. Pour connaître l'activité volumique d'un milieu en $Bq.m^{-3}$, il suffit de multiplier ce rapport par la concentration de ce milieu en carbone stable (exprimé en $kg.m^{-3}$).

L'activité mesurée dans les végétaux était égale à 226 $Bq.kg^{-1}$ de carbone stable en 1956. Elle est passée dans les années 60 à près de 400 $Bq.kg^{-1}$ du fait des tirs nucléaires atmosphériques. En 1995, elle est redescendue à 252 $Bq.kg^{-1}$.

La radioactivité de fond de l'atmosphère en ^{14}C est de l'ordre de 211 $Bq.kg^{-1}$ de carbone stable ou, en activité volumique, de 4.10^{-2} $Bq.m^{-3}$ (la concentration en carbone stable de l'atmosphère est de l'ordre de $1,9.10^{-4}$ $kg.m^{-3}$).

La radioactivité du ^{14}C des eaux marines est comprise entre 107 et 264 $Bq.kg^{-1}$ de carbone stable, correspondant à une activité volumique de 0,3 à 0,74 $Bq.m^{-3}$ (la concentration en carbone stable des eaux marines est de $2,8.10^{-3}$ $kg.m^{-3}$).

- **Activité dans l'environnement autour de l'usine de retraitement de La Hague**

  Des mesures du ^{14}C dans l'environnement de La Hague ont été faites durant les trois dernières années. Le Laboratoire d'Etudes Radioécologiques de la Façade Atlantique de l'IPSN a organisé en 1997 et 1998, en collaboration avec le Groupe d'Etudes Atomiques, deux campagnes de prélèvements d'un bioindicateur, l'ajonc d'Europe. L'ajonc a été choisi car c'est une espèce ubiquiste qui concentre les radioéléments comme le ^{137}Cs, le ^{60}Co et l'^{129}I. Les quinze derniers centimètres de chaque rameau ont été prélevés, ce qui correspond à une période de croissance d'environ 3 ans. Les résultats font apparaître un marquage maximum de 461 $Bq.kg^{-1}$ de carbone, soit près de deux fois le bruit de fond au Hameau Thiébot et un marquage minimum de 298 $Bq.kg^{-1}$ de carbone à Omonville la Rogue, légèrement supérieur au bruit de fond. Ce marquage est dû à la fois au transfert direct dû aux rejets gazeux, et au transfert de radioéléments du milieu marin vers le milieu terrestre côtier par l'intermédiaire des embruns marins. COGEMA a réalisé en 1996 des prélèvements d'herbe et de feuilles de frêne pour le milieu terrestre, d'algues (fucus), mollusques, crustacés et poissons pour le milieu marin. La concentration maximale dans le milieu terrestre est de 1142 $Bq.kg^{-1}$ de carbone stable, soit environ 5 fois le bruit de fond. Il s'agit de l'herbe prélevée au sud-ouest du site COGEMA. La concentration maximale dans le milieu marin est de 723 $Bq.kg^{-1}$ de carbone et correspond à une algue (Fucus) prélevée à Ecalgrain. Les résultats publiés par Greenpeace [communiqué de presse du 12 novembre 1998] sont cohérents avec ces valeurs puisque Greenpeace a mesuré, dans des prélèvements d'herbe et de feuilles, « des concentrations 2 à 7 fois supérieures à celles qu'on trouve normalement dans l'environnement ».

V. METROLOGIE ENVIRONNEMENTALE

Il est souvent difficile de mesurer le ^{14}C car il est en présence d'autres émetteurs β (tritium) plus abondants. Il est donc nécessaire d'avoir des techniques spécifiques d'échantillonnage et de mesure. Le carbone de l'échantillon doit être récupéré sous forme d'un gaz pur (CO_2 et parfois CH_4) pour les mesures par compteur proportionnel (CP). Pour des mesures par scintillation liquide (LSC), trois types de techniques peuvent être utilisés :

(i) le carbone est mis sous forme de carbonate de baryum et plongé dans le liquide scintillant,

(ii) le carbone sous forme CO_2 est directement dissous dans le liquide scintillant « Carbosorb »,

(iii) le carbone de l'échantillon est transformé en CO_2, en acétylène puis en benzène.

Le carbone est sous forme de graphite pour les mesures par accélérateur (AMS). A titre indicatif, le tableau suivant présente les limites de détection pour chaque technique :

	CP		LSC			AMS
Limite de détection	**CO_2**	**CH_4**	**$BaCO_8$**	**Carbosorb**	**C_6H_6**	
en Bq/kgC	0,3	0,6	[58-435]	23	0,6	0,2
en mBq/m^3	0,05	0,1	[10-74]	4	0,1	0,03

VI. EXPOSITION EXTERNE

Les coefficients de dose efficace sont issus du rapport n°12 du Federal Guidance (1993), et sont valables quel que soit l'âge de l'individu exposé.

	Dose efficace
Panache	$2{,}24.10^{-19}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)
Dépôt	$1{,}61.10^{-20}$ (Sv /s) / (Bq/m^2)
Immersion dans l'eau	$4{,}39.10^{-22}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)

VII. CONTAMINATION EXTERNE DE LA PEAU

Une contamination homogène superficielle de 1000 Bq.cm^{-2} de peau délivre un débit de dose équivalente à l'épiderme (couche superficielle de la peau) de $0{,}32.10^{-3}$ Sv.h^{-1} [INRS, fiche ^{14}C].

VIII. EXPOSITION INTERNE

VIII.1 BIOCINETIQUE

- **Carbone minéral** : La mauvaise absorption du carbone minéral et l'élimination très rapide d'une grande partie de la fraction absorbée expliquent qu'il y ait encore peu de données sur son métabolisme. Il faut noter qu'au cours de l'inhalation, 1 % du carbone à l'état de CO_2 est retenu par l'organisme par suite de la mise en solution sous forme de bicarbonate. Sous cette forme, une partie se fixe dans l'os.
- **Carbone organique** : La première approche consiste à considérer le système du carbone organique total dans l'organisme entier comme un système en état stationnaire. En effet, pour l'homme standard de 70 kg, la masse totale de ^{12}C de l'organisme entier est égale à 14 kg. Or, chaque jour, l'ingestion du carbone est en moyenne de 350 g et la masse éliminée sensiblement identique. Cependant, ce modèle à un compartiment est insuffisant pour décrire le métabolisme des molécules marquées. Des modèles à plusieurs exponentielles sont nécessaires car les molécules ont des localisations et des fonctions de rétention différentes selon leur type. En règle générale, on peut admettre que le carbone organique a sensiblement le même métabolisme que le tritium des mêmes molécules marquées, sauf lorsque le tritium est fixé sur une liaison labile.

[Pour plus de renseignements : voir Base de données « Calliope », 1999]

VIII.2 RADIOTOXICITE

Groupe de radiotoxicité : 3 (modérée)

(décret 88-521 du 18/04/88)

Pas de radiotoxicité particulière.

VIII.3 MESURE

Analyse radiotoxicologique urinaire (recueil immédiat des urines et mesure des urines recueillies pendant 24 h). L'interprétation des résultats dépend étroitement des conditions de l'incorporation et du délai de recueil des urines.

VIII.4 COEFFICIENTS DE DOSE

Pour le public, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** pour l'adulte et jusqu'à l'âge de **70 ans** pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de **0,9 $m^3.h^{-1}$** et de **0,2 $m^3.h^{-1}$**.

		Adulte	**Enfant (1-2 ans)**
Inhalation	-Aérosol (type M) AMAD = 1 µm	$2{,}0.10^{-9}$	$6{,}6.10^{-9}$
	-Dioxyde de carbone	$6{,}2.10^{-12}$	$1{,}9.10^{-11}$
	-Monoxyde de carbone	$8{,}0.10^{-13}$	$5{,}7.10^{-12}$
	-Vapeur de carbone	$5{,}8.10^{-10}$	$1{,}6.10^{-9}$
	-Méthane	$2{,}9.10^{-12}$	$7{,}8.10^{-12}$
Ingestion		$5{,}8.10^{-10}$	$1{,}6.10^{-9}$

Pour l'individu moyen, la dose efficace annuelle est de 15 µSv (essentiellement par ingestion) dont 12 µSv sont dus au ^{14}C d'origine naturelle [UNSCEAR, 1993].

Pour le travailleur, les données sont issues de la Directive Européeenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** et un débit respiratoire moyen égal à **1,2 $m^3.h^{-1}$**.

		Dose efficace (Sv/Bq)
		Adulte
Inhalation	-Dioxyde de carbone	$6{,}5.10^{-12}$
	-Monoxyde de carbone	$8{,}0.10^{-13}$
	-Vapeur de carbone	$5{,}8.10^{-10}$
	-Méthane	$2{,}9.10^{-12}$
Ingestion		$5{,}8.10^{-10}$

IX. ACCIDENT

IX.1 REPONSE MEDICALE

En cas de contamination de la peau : décontamination par lavage avec des produits non abrasifs, non corrosifs, non toxiques et si possible adaptés à la forme chimique du radionucléide. En cas de contamination interne : recueil immédiat des urines et recueil pendant 24 heures.

IX.1 REPONSE SANITAIRE

En cas d'accident, la seule mesure de protection nécessaire concerne la population proche qui sera invitée à rester à l'abri à l'intérieur des habitations pendant le passage du nuage radioactif.

X. TEXTES REGLEMENTAIRES GENERAUX

Les limites annuelles de dose de la Directive Européenne n°96/29/EURATOM du13 mai 1996 sont les suivantes :

	Public	**Travailleur**
Dose efficace	1 mSv	100 mSv/ 5ans consécutifs et au plus 50 mSv/an
Dose équivalent à la peau	50 mSv	500 mSv

- Brochure du Journal Officiel (J.O.) n°1420 : protection contre les rayonnements ionisants. Ce document rassemble tous les textes législatifs et réglementaires de radioprotection et notamment :
  - Le décret n° 88-521 du 18 avril 1988 modifiant le décret du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de radioprotection ;
  - Le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 modifié relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants et ses textes d'application.
- Directive Européenne n°96/29/EURATOM adoptée le 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.

XI. BIBLIOGRAPHIE

- Calliope, CD-Rom, Collection IPSN, 1999.
- NCRP, Carbon 14 in the Environment, National Council on Radiation Protection and measurements, Report n° 81, Bethesda, 1985.
- DELACROIX D., GUERRE J.P., LEBLANC P., Radionucléides et Radioprotection, Saclay, CEA, Paris,1994.
- Federal Guidance Report n°12. External exposure to radionuclides in air, water and soil. Oak Ridge National Laboratory, 1993.
- GALLE P., Toxiques nucléaires, Paris, Masson (2e édition), 1997.
- Nucléides, CD-Rom, Collection CEA, 1999.

- OECD/NEA, Radiological significance and management of TRITIUM, CARBON 14, KRYPTON 85, IODINE 129 arising from the nuclear fuel cycle, Paris, 1980.
- OPRI/INRS, Carbon 14 : Fiche technique de radioprotection pour l'utilisation de radionucléides en sources scellées, 1996.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, New York, United Nations, 1993.

Rédacteurs de la Fiche : P. Bérard, M.L. Perrin, E. Gaillard-Lecanu, V. Chambrette, J. Brenot (DPHD), B. Crabol (DPRE).

Vérificateur : A. Desprès (DPHD)

Fiche radionucléide **Aspects médicaux et sanitaires**

$^{90}_{38}Sr$

1.3 STRONTIUM 90 + YTTRIUM 90

I. CARACTERISTIQUES

I.1 CHIMIQUES

Le strontium appartient, comme le calcium, au groupe des métaux alcalino-terreux. En solution, il est le plus souvent sous forme de sels très solubles de chlorures ou nitrates.

I.2 NUCLEAIRES

Le strontium naturel est un mélange de quatre isotopes stables (^{84}Sr ; ^{86}Sr ; ^{87}Sr ; ^{88}Sr). Parmi les 15 isotopes radioactifs connus (de nombre de masse s'échelonnant de 80 à 97), les plus importants sont ^{85}Sr, ^{89}Sr et ^{90}Sr. Le ^{90}Sr résulte de la chaîne de fission du Brome 90. Il conduit par désintégration β^- à l'Yttrium 90, lui-même émetteur β^- de période radioactive courte (64h).

[Voir Base de données « Nucléides », 1999]

Période radioactive		29,12 ans
Activité massique		$5{,}05.10^{12}$ Bq.g^{-1}
Poids du Becquerel		$1{,}98.10^{-13}$ g.Bq^{-1}
Emissions principales	^{90}Sr	100% désintégration β^- (Emax = 546 keV)
	^{90}Y	100% désintégration β^- (Emax = 2280 keV)

II. ORIGINE

II.1 NATURELLE

-sans objet-

II.2 ARTIFICIELLE

- **Explosions nucléaires atmosphériques**

  De 1945 à 1980, les explosions nucléaires atmosphériques ont conduit à la dispersion de 6.10^{17} Bq de 90Sr dans l'atmosphère. Le dépôt de ^{90}Sr a atteint un maximum en 1963-1964. L'activité totale déposée dans l'environnement par les essais nucléaires atmosphériques atteignait pour l'ensemble du globe $5{,}9.10^{17}$ Bq en 1976. L'activité surfacique était maximale dans les régions tempérées des deux hémisphères et elle a atteint $3{,}2.10^{3}$ Bq.m^{-2} entre le 40e et le 50e parallèle de l'hémisphère Nord [Galle, 1997].

- **Emissions par les installations nucléaires**

La deuxième source de ^{90}Sr est le cycle du combustible. Le ^{90}Sr est créé par fission au sein des réacteurs. Lors du traitement du combustible irradié, le strontium est extrait avec les autres produits de fission. L'essentiel des rejets de ^{90}Sr + ^{90}Y s'effectue au stade du retraitement des combustibles irradiés. En 1999, les rejets de l'usine de La Hague se sont élevés à $1{,}7.10^{12}$ Bq en quasi totalité sous forme liquide ; ceux de l'usine de Sellafield représentaient 16.10^{12} Bq sous forme liquide et $0{,}13.10^{9}$ Bq sous forme gazeuse en 1996.

- **Rejets accidentels par les installations nucléaires**

L'accident de Kyshtym (Oural) en 1957 a entraîné un dépôt sur 15 000 km^2 de 10^{17} Bq dont 5,4 % de ^{90}Sr. Lors de l'accident de Tchernobyl (1986), environ 8.10^{15} Bq de ^{90}Sr ont été rejetés dans l'atmosphère.

III. UTILISATIONS INDUSTRIELLES ET MEDICALES

Dans le secteur industriel, les sources de ^{90}Sr (activité de 4.10^{7} à 4.10^{10} Bq) servent à générer des électrons pour les jauges de mesure d'épaisseur et la pré-ionisation de tubes électroniques. Dans le domaine médical, elles sont utilisées en radiothérapie pour des applications cutanées.

IV. TRANSFERT A L'ENVIRONNEMENT

Actuellement, l'exposition au ^{90}Sr est négligeable, et provient du reliquat des retombées des essais nucléaires atmosphériques. Dans le milieu marin, la dilution isotopique est telle que la fixation du ^{90}Sr sur les espèces marines est très faible. Par contre, au maximum des retombées, l'activité des eaux potables et de rivière était comprise entre 5.10^{-3} et $3{,}4.10^{-1}$ $Bq.l^{-1}$. Dans les lacs de montagne, des concentrations de l'ordre de 3 $Bq.l^{-1}$ ont été relevées en 1964 [Galle, 1997]. Les observations faites sur les territoires entourant Tchernobyl, montrent que le strontium est au moins deux fois plus mobile que le césium et qu'il est mesuré à plusieurs mètres de profondeur dans des terrains dépourvus de matière organique [Tchernobyl, 13 ans après, dossier IPSN].

V. METROLOGIE ENVIRONNEMENTALE

Après minéralisation des échantillons, les éléments alcalino-terreux sont isolés par coprécipitation par une solution d'oxalate d'ammonium, suivie d'une calcination. L'hydroxyde d'yttrium formé est ensuite éliminé de l'échantillon par précipitation. Quinze jours plus tard, l'yttrium nouvellement formé est précipité sous forme d'oxalate d'yttrium. Le comptage de ^{90}Y est effectué avec un compteur β et l'activité du ^{90}Sr est donnée par l'activité de ^{90}Y à l'équilibre.

La connaissance de la concentration en calcium de l'échantillon permet d'exprimer dans certains cas, l'activité du ^{90}Sr en $Bq.g^{-1}$ de calcium, le calcium étant l'homologue chimique de ^{90}Sr [Foulquier L. et Bretheau F., 1998].

VI. EXPOSITION EXTERNE

Les coefficients de dose efficace sont issus du rapport n°12 du Federal Guidance (1993), et sont valables quel que soit l'âge de l'individu exposé.

	Dose efficace
Panache	$1{,}98.10^{-16}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)
Dépôt	$5{,}61.10^{-18}$ (Sv /s) / (Bq/m^2)
Immersion dans l'eau	$3{,}78.10^{-19}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)

VII. CONTAMINATION EXTERNE DE LA PEAU

Une contamination homogène superficielle de 1000 Bq.cm^{-2} de peau délivre un débit de dose équivalente à l'épiderme (couche superficielle de la peau) de $3{,}6.10^{-3}$ Sv.h^{-1} [INRS, fiche ^{90}Sr + ^{90}Y].

VIII. EXPOSITION INTERNE

VIII.1 BIOCINETIQUE

Le strontium se dépose principalement dans l'os trabéculaire et cortical, où il est retenu. Il existe aussi une rétention dans le foie et les autres tissus mous. Les études cinétiques montrent la similitude qualitative des distributions du calcium et du strontium. Quantitativement, l'organisme établit cependant une discrimination entre les deux processus métaboliques, à l'avantage du calcium. La chaîne alimentaire constitue la principale voie d'apport du ^{90}Sr à l'homme. L'inhalation ne représente qu'un apport mineur [Galle, 1997].

[Pour plus de renseignements : voir logiciel " Calliope ", 1999]

VIII.2 EFFETS BIOLOGIQUES

On n'a jamais constaté chez l'homme d'effet pathologique dû au ^{90}Sr. A signaler une augmentation de la fréquence des aberrations chromosomiques chez les peintres tchécoslovaques contaminés, corrélée aux débits de dose à la moelle osseuse [Galle, 1997]. Des études expérimentales sur animaux montrent en particulier, des perturbations de la formule sanguine, une réduction de la croissance, l'apparition de tumeurs osseuses et de leucémies [Galle, 1997].

VIII.3 RADIOTOXICITE

Groupe de radiotoxicité : 2 (forte)

(décret du 88-521 du 18/ 04/ 88)

VIII.4 MESURE

^{90}Sr	Méthode de mesure		Limite de détection
	Scintillation liquide	Urine	1 Bq.l^{-1}

Le ^{90}Sr, émetteur β pur étant toujours associé à son descendant radioactif ^{90}Y, émetteur β, les mesures nécessitent une séparation chimique préalable. La limite de détection de 1 Bq.l^{-1} correspond à la surveillance

de situations anormales. Pour la surveillance de routine des composés peu solubles du ^{90}Sr (type S, pour les seuls travailleurs), il est indispensable d'abaisser le plus possible la limite de détection.

VIII.5 COEFFICIENTS DE DOSE

Pour le public, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** pour l'adulte et jusqu'à l'âge de **70 ans** pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de **0,9 $m^3.h^{-1}$** et de **0,2 $m^3.h^{-1}$**.

		Dose efficace (Sv/Bq)	
		Adulte	**Enfant (1-2 ans)**
Inhalation	Aérosol (type M) AMAD = 1 µm	$3{,}74.10^{-8}$	$1{,}1.10^{-7}$
Ingestion		$3{,}0.10^{-8}$	$9{,}3.10^{-8}$

Pour le travailleur, les données sont issues de la Directive Européenne96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans**, un débit respiratoire moyen égal à **1,2 $m^3.h^{-1}$**.

		Dose efficace (Sv/Bq)
		Travailleur
Inhalation	Aérosol (type F) AMAD = 5 µm	$3{,}0.10^{-8}$
Ingestion		$2{,}8.10^{-8}$

IX. PROTECTION DES TRAVAILLEURS

-renseigné ultérieurement

X. ACCIDENT

X.1 REPONSE MEDICALE

Le traitement préconisé en cas de contamination par du strontium, consiste à diminuer l'incorporation et à stimuler l'excrétion (OPRI,1997).

- Alginate de sodium (type Gaviscon : absorption de 10 g) : ingéré avec la nourriture, il diminue l'absorption intestinale.
- Gluconate de calcium (perfusion de 1 à 5 ampoules de 10 ml) : il augmente l'excrétion.
- Lactate de strontium (type Strontolac, en perfusion) : il facilite la dilution isotopique.
- Chlorure d'ammonium (type Chlorammonic : absorption de 6 g par jour) : il entraîne une acidose métabolique favorisant l'excrétion du strontium.

Les brûlures cutanées doivent être traitées comme des brûlures classiques.

X.1 REPONSE SANITAIRE

Dans l'Union Européenne, des normes de commercialisation ont été instaurées depuis 1987 pour être applicables dans l'éventualité d'un accident futur [Règlements Euratom 3954/87, 2218/89 et 770/90].

Denrées alimentaires prêtes à la consommation				Aliments pour le bétail prêts à la consommation		
Aliment pour le nourrisson	Produits laitiers	Autre denrée alimentaire	Liquide destiné à la consom-mation	Porc	Volaille Agneau Veau	Autres
75 $Bq.kg^{-1}$	125 $Bq.kg^{-1}$	750 $Bq.kg^{-1}$	125 $Bq.kg^{-1}$	1250 $Bq.kg^{-1}$	2500 $Bq.kg^{-1}$	5000 $Bq.kg^{-1}$

XI. TEXTES REGLEMENTAIRES GENERAUX

- Les limites annuelles de dose de la Directive Européenne n°96/29/EURATOM du 13 mai 1996 sont les suivantes :

	Public	**Travailleur**
Dose efficace	1 mSv	100 mSv/ 5 ans consécutifs et au plus 50mSv/an
Dose équivalente à la peau	50 mSv	500 mSv

- Brochure du Journal Officiel (J.O.) n°1420 : protection contre les rayonnements ionisants. Ce document rassemble tous les textes législatifs et réglementaires de radioprotection et notamment :
  - Le décret n° 88-521 du 18 avril 1988 modifiant le décret du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de radioprotection ;
  - Le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 modifié relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants et ses textes d'application.
- Directive Européenne n°96/29/EURATOM adoptée le 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.

XII. BIBLIOGRAPHIE

- Calliope, CD-Rom, Collection IPSN, 1999.
- DELACROIX D., GUERRE J.P., LEBLANC P., Radionucléides et Radioprotection, Saclay, CEA, Paris, 1994.

- Federal Guidance Report n°12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. Oak Ridge National Laboratory, 1993.
- FOULQUIER L., BRETHEAU F., Les Installations Nucléaires et l'Environnement, Editions de Physique, Paris, 1998.
- GALLE P., Toxiques nucléaires, Paris, Masson (2e édition), 1997.
- Nucléides, CD-Rom, Collection CEA, 1999.
- OPRI, Intervention médicale en cas d'accident radiologique, Rapport du Conseil Scientifique OPRI, 1997.
- OPRI/INRS, Strontium-90 : Fiche technique de radioprotection pour l'utilisation de radionucléides en sources scellées, 1996.
- NCRP, Some aspects of strontium radiobiology, National Council on Radiation Protection and measurements, Report n°110, Bethesda, 1991.
- Tchernobyl 13 ans après, Dossier de presse IPSN, avril 1999.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, New York, United Nations, 1993.

Rédacteurs de la Fiche: P. Bérard, B. Le Guen, M.L. Perrin, A. Desprès, E. Gaillard-Lecanu, V. Chambrette (DPHD)

Vérificateur : J. Brenot (DPHD)

Fiche radionucléide **Aspects médicaux et sanitaires**

$^{137}_{55}Cs$

1.4 CESIUM 137 + BARYUM 137M

I. CARACTERISTIQUES

I.1 CHIMIQUES

Le césium appartient, comme le potassium et le sodium, à la classe des métaux alcalins.

I.2 NUCLEAIRES

Le ^{137}Cs, émetteur β^-, donne naissance avec un rendement de 0,946 (94,6 %) au baryum 137 métastable de période 2,55 minutes. Il donne aussi naissance avec un rendement de 0,054 (5,4 %) au baryum 137 stable.Le baryum 137m conduit au baryum 137 stable, avec émission gamma (rendement 0,85 (85%)).

[Voir Base de données « Nucléides », 1999]

Période radioactive		30,15 ans
Activité massique		$3,2.10^{12}$ Bq.g^{-1}
Poids du Becquerel		$3,1.10^{-13}$ g.Bq^{-1}
Emissions principales	^{137}Cs	94,6 % désintégration β^- (Emax = 514 keV) 5,4 % désintégration β^- (Emax = 1176 keV)
	^{137m}Ba	γ (E = 662 keV) : 85% X (E = 32,9 keV) : 7%

II. ORIGINE

II.1 NATURELLE

- sans objet

II.2 ARTIFICIELLE

- **Explosions nucléaires atmosphériques**

  Pendant la période 1945-1980, plusieurs centaines d'essais nucléaires atmosphériques ont été effectués par différentes nations, essentiellement les USA et l'ex-URSS. Ils ont libéré dans l'environnement une quantité de ^{137}Cs estimée à 1.10^{18} Bq, qui s'est peu à peu déposée sur l'ensemble de la planète. Sous nos latitudes (40°-50° Nord), les dépôts de cette époque s'élèvent à 3000 Bq.m^{-2}. Une grande partie de la radioactivité qui subsiste aujourd'hui est retenue dans le sol et les sédiments. Quelques pour cent seulement restent disponibles pour les végétaux.
- **Emissions par les installations nucléaires**

La deuxième source de ^{137}Cs est le cycle du combustible. Le cœur d'un réacteur de 1300 MWe contient en fin de cycle, environ 4.10^{17} Bq confinés à l'intérieur du combustible. En fonctionnement normal, une faible fraction de ce césium se retrouve dans les effluents rejetés dans l'environnement. A titre indicatif en 1996, un réacteur nucléaire de 1300 MWe rejetait annuellement environ 10^8 Bq, en quasi totalité dans les effluents liquides. Lors du retraitement du combustible irradié, le césium est extrait avec les autres produits de fission. Les rejets de^{137}Cs de l'usine de retraitement de la Hague s'élevaient à $1,3.10^{12}$ Bq en 1999 et ceux de l'usine de Sellafield à 1.10^{13} Bq en 1996, en quasi totalité sous forme liquide. En cas d'accident, l'émission de ^{137}Cs dans l'environnement peut être plus ou moins importante, compte tenu de sa volatilité. En 1957, les accidents de Kyshtym (ex-URSS) et de Windscale (GB) ont respectivement entraîné des rejets de ^{137}Cs de $3,6.10^{13}$ et $2,2.10^{13}$ Bq.

Pour Tchernobyl, l'activité du ^{137}Cs émis dans l'environnement est estimée à $8,5.10^{16}$ Bq. Le dépôt au sol à l'origine de l'essentiel des expositions actuelles et futures a été variable selon la distance depuis le point d'émission, la trajectoire du nuage, les conditions atmosphériques. Les pluies ont entraîné des dépôts plus importants. Dans les zones proches de Tchernobyl (de quelques dizaines à quelques centaines de km), le dépôt a pu atteindre plusieurs millions de $Bq.m^{-2}$; en Europe centrale, l'ordre de grandeur a été de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de $Bq.m^{-2}$. En France, des dépôts de quelques milliers de $Bq.m^{-2}$ sont observés [Tchernobyl, 13 ans après, dossier IPSN] ; des dépôts de quelques dizaines de milliers de $Bq.m^{-2}$ sont observés dans certaines zones montagneuses (Mercantour, Vosges).

III. UTILISATIONS INDUSTRIELLES ET MEDICALES

Ces sources sont élaborées à partir d'un bombardement neutronique de césium stable. Les sources ainsi produites sont dites scellées car le césium est à l'intérieur d'une capsule scellée. A l'intérieur de la capsule, le césium est généralement mélangé avec une résine mais certaines sources plus anciennes pouvaient contenir une poudre de chlorure de césium qui, en cas de rupture de la source, rendait le césium très dispersable. Les sources scellées de ^{137}Cs sont utilisées en médecine et dans l'industrie. Leur activité peut varier de façon considérable (106 Bq jusqu'à 10^{11} Bq). En 1998, 12 000 sources étaient répertoriées par le secrétariat permanent de la Commission Interministérielle des Radioéléments Artificiels (CIREA), et réparties de la façon suivante :

- médecine et biologie humaine, 1 800 sources pour une activité totale de 7.10^{15} Bq,
- industrie, 10 200 sources pour une activité totale de $4,13.10^{12}$ Bq.

La brachythérapie utilise des sources de ^{137}Cs (ou ^{192}Ir) d'activités assez faibles voisines de quelques 109 Bq car dans cette technique, la source est mise au contact de la tumeur à traiter à l'aide d'un cathéter installé chirurgicalement ou empruntant les voies naturelles. L'irradiation des produits sanguins est effectuée à l'aide de sources de ^{137}Cs (où ^{60}Co) d'activités comprises entre 0,4 et $2,2.10^{14}$ Bq, l'objectif étant d'inhiber la division lymphocytaire afin d'éviter les risques de maladie post-transfusionnelle chez les patients immunodéprimés.
L'utilisation de sources dans l'industrie est essentiellement due à l'emploi de sources scellées dans les appareils de gammagraphie pour le contrôle non destructif de pièces, de soudures ou d'ouvrages d'art, dans les irradiateurs industriels pour la stérilisation ou la conversion des aliments, pour l'étalonnage des appareillages.

Toujours dans l'industrie, le césium, sous forme de sources scellées, est utilisé dans les irradiateurs de laboratoire, mais également pour des techniques telles que la diagraphie, l'élimination de l'électricité statique et la mesure de l'enneigement.

IV. TRANSFERT A L'ENVIRONNEMENT

Elément alcalin très réactif, le césium ne peut pas exister à l'état élémentaire dans l'environnement. Dans l'atmosphère, il est sous forme d'aérosols, mais surtout d'oxyde Cs_2O ou d'hydroxyde de CsOH en présence d'eau. Il est très soluble dans l'eau, et présente une grande affinité pour les minéraux et particulièrement pour les argiles. D'une façon générale, le césium se dépose sur le sol et migre peu, tout particulièrement en présence d'argile. Si un rejet d'effluent intervient dans un fleuve en période d'étiage en eau claire, l'ion Cs^+ sera dispersé par dilution. Par contre en eau trouble, une grande partie du césium sera piégée par les matières argileuses en suspension et accumulée par sédimentation. De ce fait, on peut distinguer deux types de comportement : une phase dynamique dans l'air et l'eau et une phase statique dans les sols et les sédiments [Actualités sur le Césium,1994].

Cette affinité pour les minéraux a pour conséquence de limiter le transfert du césium aux plantes par absorption racinaire. Lorsqu'il est présent dans l'alimentation des animaux (pâturages, fourrages…), le ^{137}Cs est bien assimilé et se retrouve dans les produits consommés par l'homme comme le lait et la viande. Son transfert au lait est rapide, 5 à 6 heures après ingestion par l'animal, le maximum apparaissant au bout de 8 jours.

En 1997, l'activité volumique du ^{137}Cs dans l'air en France s'élève à $0,6.10^{-6}$ $Bq.m^{-3}$ en moyenne sur l'année.

V. METROLOGIE ENVIRONNEMENTALE

Les mesures de ^{137}Cs dans l'environnement peuvent être effectuées sur des prélèvements d'air, d'eau, de sol, de végétaux ou de produits animaux. L'analyse se fait par spectrométrie γ.

VI. EXPOSITION EXTERNE

Les coefficients de dose efficace sont issus du rapport n°12 du Federal Guidance (1993), et sont valables quel que soit l'âge de l'individu exposé.

	Dose efficace
Panache	$2,73.10^{-14}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)
Dépôt	$5,55.10^{-16}$ (Sv /s) / (Bq/m^2)
Immersion dans l'eau	$5,92.10^{-17}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)

VII. CONTAMINATION EXTERNE DE LA PEAU

Après contamination cutanée, le césium est difficile à éliminer. Sa période au niveau de la peau serait d'environ quatre jours. Le dépôt d'une activité importante entraîne une dose locale élevée et par conséquent une brûlure cutanée.

Une contamination homogène superficielle de 1000 $Bq.cm^{-2}$ de peau délivre un débit de dose équivalente à l'épiderme (couche superficielle de la peau) de $1,6.10^{-3}$ $Sv.h^{-1}$ [INRS, fiche ^{137}Cs + ^{137m}Ba].

VIII. EXPOSITION INTERNE

VIII.1 BIOCINETIQUE

Sous sa forme stable, le ^{133}Cs n'est retenu qu'en très faible quantité par l'organisme humain. La Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) évalue à 10 µg la masse de césium stable présente dans un adulte à comparer aux masses de potassium stable de 140 g chez l'homme et de 90 g chez la femme.

Le césium incorporé par l'homme se distribue comme son homologue et compétiteur naturel le potassium, dans l'ensemble de l'organisme en se concentrant préférentiellement dans le muscle. Les expérimentations animales et les observations humaines ont montré que le césium **ingéré** sous forme de chlorure de césium, était rapidement transféré au secteur extra-cellulaire (80 à 95 % en 24 h chez le rat). Bien que la forme physico-chimique du césium et la composition de la ration alimentaire influent sur le transfert par voie digestive du césium, la CIPR a préconisé de retenir un facteur de transfert de 100 %. Il s'opère donc rapidement un équilibre dynamique tel que 99 % se trouve dans le secteur intracellulaire et 1 % dans le secteur extra-cellulaire de tous les organes ou tissus mous. En raison de la très grande richesse du muscle en potassium, le césium y est présent en très grande quantité. En ce qui concerne **l'inhalation** du césium, l'absorption sanguine de celui-ci est rapide (classe recommandée F dans le nouveau modèle pulmonaire de la CIPR).

Du fait de l'augmentation du poids corporel, **la période biologique** du ^{137}Cs augmente avec l'âge (20 jours pour l'enfant contre 150 jours pour l'adulte) et est plus élevée chez l'homme (150 jours) que chez la femme (100 jours). Une relation linéaire relie la période biologique au potassium total et à la masse musculaire. L'excrétion urinaire est prépondérante sur l'excrétion fécale.

Au début d'une contamination par ingestion, la dose de césium à l'organisme augmente en fonction du temps. Après un an d'incorporation continue ou journalière, un état d'équilibre s'instaure, l'activité moyenne de césium ingérée quotidiennement devient égale à l'activité moyenne de césium éliminée par jour et la dose atteint un plateau.

[Pour plus de renseignements : voir Logiciel " Calliope ", 1999]

VIII.2 RADIOTOXICITE

Groupe de radiotoxicité : 3 (modérée)

(décret du 88-521 du 18/04/88)

La toxicité chimique du césium étant faible, seule la radiotoxicité du ^{137}Cs est à considérer. Celle-ci a été expérimentée sur l'animal (chien) : l'activité massique létale 50 (i.e. conduisant au décès d'un animal sur deux) est de l'ordre de 1.10^{8} $Bq.kg^{-1}$ et aucun effet toxique aigu n'a été observé au-dessous de 5.10^{7} $Bq.kg^{-1}$.

VIII.3 MESURE

La mesure corporelle du ^{137}Cs est effectuée par anthropogammamétrie, sans problème de détection.

^{137}Cs	Méthode de mesure		Limite de détection
	Spectrométrie γ	Corps entier	50 Bq
		Urine	1 Bq.l^{-1}

VIII.4 COEFFICIENTS DE DOSE

Pour le public, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** pour l'adulte et jusqu'à l'âge de 70 ans pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de **0,9 m^3.h^{-1}** et de **0,2 m^3.h^{-1}**.

		Dose efficace (Sv/Bq)	
		Adulte	**Enfant (1-2 ans)**
Inhalation	Aérosol (type F) AMAD = 1 µm	4,6.10^{-9}	5,4.10^{-9}
Ingestion		1,3.10^{-8}	1,2.10^{-8}

Pour le travailleur, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** et un débit respiratoire moyen égal à **1,2 m^3.h^{-1}**.

		Dose efficace (Sv/Bq)
		Travailleur
Inhalation	Aérosol (type F) AMAD = 5µm	6,7.10^{-9}
Ingestion		1,3.10^{-8}

IX. PROTECTION DES TRAVAILLEURS

IX. INDIVIDUELLE

Pose d'écrans en plomb pour atténuer l'irradiation externe.

X. ACCIDENT

X.1 HISTORIQUE

En fonctionnement normal, les sources de ^{137}Cs n'entraînent pas d'exposition pour la population car le césium est hermétiquement confiné dans une capsule scellée et transporté dans un colis adapté à l'activité de la source. Les accidents surviennent généralement lorsqu'une source est abandonnée sans précaution ou perdue,

930 récupérée par une personne n'en connaissant pas les dangers, ou détruite. De nombreux accidents de ce type
931 se sont déjà produits, par exemple à Goïania (Brésil) en 1987 où 5.10^{13} Bq ont été dispersés dans
932 l'environnement (4 morts, plusieurs centaines de personnes contaminées), et en Géorgie en 1996 et 1997 (11
933 personnes irradiées, dont 4 gravement).

934 X.2 REPONSE MEDICALE

935 Prescription de substances :

936 • qui piègent le césium : argile ;
937 • qui facilitent la décorporation : ferrocyanure de fer (i.e. Bleu de Prusse), ou ferrocyanure de cobalt à
938 raison de 1 g, trois fois par jour (OPRI, 1996) ; l'hexacyanoferrate d'ammonium ou de potassium-fer
939 ont été testés et semblent plus efficaces.
940
941 Les brûlures cutanées doivent être traitées comme des brûlures classiques.

942 X.3 REPONSE SANITAIRE

943 En cas d'accident, la gravité de la situation peut justifier que des mesures soient prises. Les mesures d'urgence
944 comportent plusieurs possibilités à court terme :

945 • Évacuation de la population hors de la zone dangereuse,
946 • Confinement de la population dans les habitations pour la protéger de l'irradiation pendant le passage
947 du nuage radioactif,
948 • Interdiction de consommation de certains produits sensibles (légumes verts, lait),
949 • Alimentation des animaux (et des hommes…) avec des denrées non contaminées.
950
951 Mais c'est surtout à moyen et long terme que le césium pose des problèmes, comme après l'accident de
952 Tchernobyl. Compte tenu de sa période, le ^{137}Cs subsiste longtemps dans l'environnement et le cumul des
953 doses, année après année, sur l'ensemble de la vie peut atteindre des valeurs élevées.
954
955 C'est ainsi que, plusieurs années après l'accident de Tchernobyl, des évacuations fondées sur la « dose-vie »
956 ont eu lieu de 1987 à 1990 dans certaines zones fortement contaminées de l'ex-URSS, s'ajoutant à celles
957 pratiquées en urgence au voisinage de la centrale accidentée dans les jours qui ont suivi l'accident. Des
958 contraintes sur le mode de vie (interdiction de pénétrer dans certaines zones, interdiction de ramasser des
959 champignons…), sur les cultures pratiquées, sur le mode d'alimentation des animaux existent toujours dans
960 certaines régions.
961
962 Dans l'Union Européenne, des normes de commercialisation ont été instaurées depuis 1987 pour être
963 applicables dans l'éventualité d'un accident futur [Réglements Euratom 3954/87, 2218/89 et 770/90].
964

Denrées alimentaires prêtes à la consommation	Aliments pour le bétail prêts à la consommation

Aliment pour le nourrisson	Produits laitiers	Autre denrée alimentaire	Liquide destiné à la consom-mation	Porc	Volaille Agneau Veau	Autres
400 $Bq.kg^{-1}$	1000 $Bq.kg^{-1}$	1250 $Bq.kg^{-1}$	1000 $Bq.kg^{-1}$	1250 $Bq.kg^{-1}$	2500 $Bq.kg^{-1}$	5000 $Bq.kg^{-1}$

XI. TEXTES REGLEMENTAIRES GENERAUX

Les limites de dose annuelles de la Directive Européenne n°96/29/EURATOM du 13 mai 1996 sont les suivantes :

	Public	**Travailleur**
Dose efficace	1 mSv	100 mSv/ 5 ans consécutifs et au plus 50mSv/an
Dose efficace à la peau	50 mSv	500 mSv

- Brochure du Journal Officiel (J.O.) n°1420 : protection contre les rayonnements ionisants. Ce document rassemble tous les textes législatifs et réglementaires de radioprotection et notamment :
  - Le décret n° 88-521 du 18 avril 1988 modifiant le décret du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de radioprotection ;
  - Le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 modifié relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants et ses textes d'application.
- Directive Européenne n°96/29/EURATOM adoptée le 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.

XII. BIBLIOGRAPHIE

- Actualités sur le Césium, Paris, EDF, n°8, 1994 : 23-32.
- Calliope, CD-Rom, Collection IPSN, 1999.
- NCRP, Cesium 137 from the environment to man : metabolism and dose, National Council on Radiation Protection and measurements, Report n°52, Bethesda, 1977.
- DELACROIX D., GUERRE J.P., LEBLANC P., Radionucléides et Radioprotection, Saclay, CEA, Paris, 1994.
- Federal Guidance Report n°12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. Oak Ridge National Laboratory, 1993.
- IPSN/DSMR-DPRE, Fiche de radiotoxicité des matières transportées en sources scellées Césium 137,3/02/2000.
- GALLE P., Toxiques nucléaires, Paris, Masson (2e édition), 1997.
- Nucléides, CD-Rom, Collection CEA, 1999.

- OPRI/INRS, Césium 137 : Fiche technique de radioprotection pour l'utilisation de radionucléides ensources scellées, 1996.
- Tchernobyl 13 ans après, Dossier de presse IPSN, avril1999.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, New York, United Nations, 1993.

Rédacteurs de la Fiche : P. Bérard, B. Le Guen, M.L. Perrin, A. Desprès, E. Gaillard-Lecanu, V. Chambrette, J. Brenot (DPHD)

Vérificateur : D. Robeau (IPSN/Dir)

Fiche radionucléide **Aspects médicaux et sanitaires**

$^{226}_{88}Ra$

1.5 RADIUM 226 ET SES DESCENDANTS A L'EQUILIBRE

I. CARACTERISTIQUES

I.1 CHIMIQUES

Le radium, métal blanc et brillant, appartient à la catégorie des alcalino-terreux.

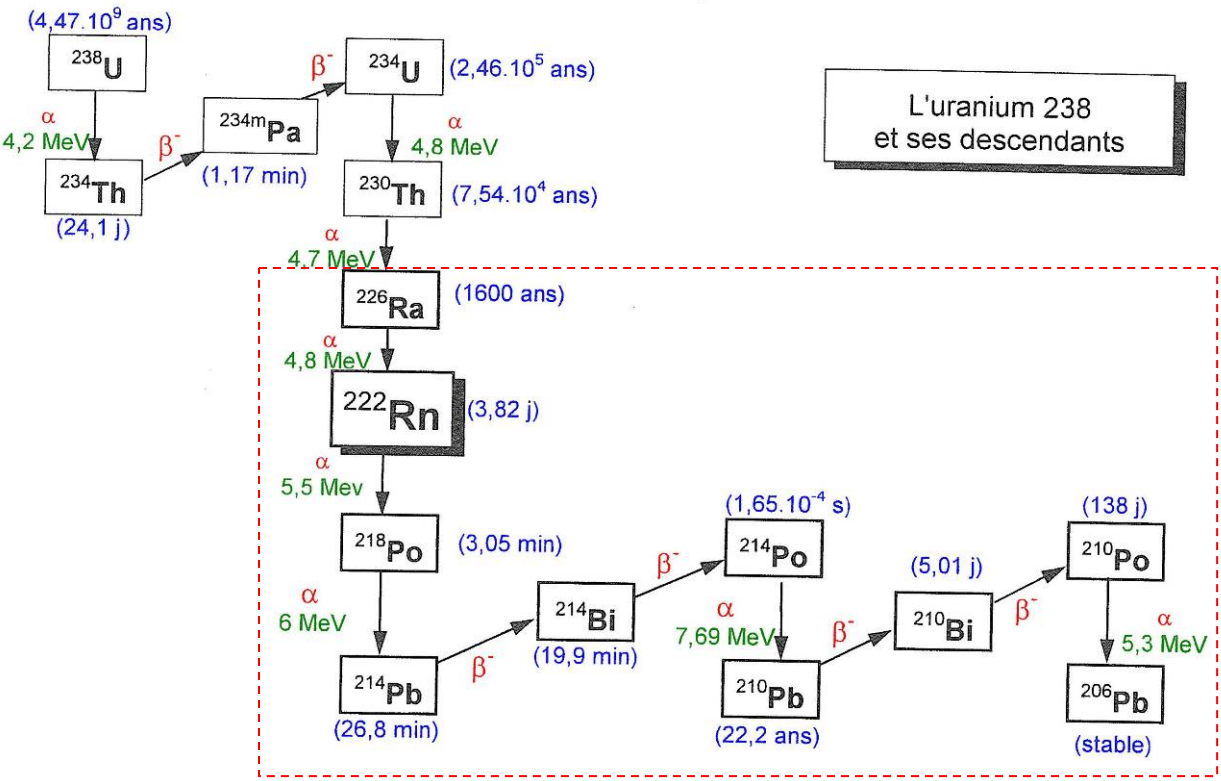
I.2 NUCLEAIRES

Parmi les 25 isotopes radioactifs du radium, le ^{226}Ra est majoritaire. Il résulte de la chaîne de désintégration du ^{238}U. Par émission α, il se désintègre en ^{222}Rn (T=3,8 jours) qui est un gaz, lui-même émetteur α.

[Voir Base de données « Nucléides », 1999]

Période radioactive	1622 ans
Activité massique	$3,66.10^{10}$ Bq.g^{-1}
Poids du Becquerel	$2,73.10^{11}$ g.Bq^{-1}
Emissions principales	α_1 (E = 4784 keV): 94% α_2 (E = 4602 keV): 6% γ (E = 180 keV) : 3%

Les descendants du ^{226}Ra apparaissent dans la chaîne de filiation de l'^{238}U :



II. ORIGINE

II.1 NATURELLE

Le radium à l'état pur n'existe pas ; il est toujours à l'équilibre avec ses descendants. Il est présent dans les sols uranifères (à raison de 1 gramme de radium pour 3 tonnes d'uranium dans le minerai) mais son rayonnement γ (via ses descendants) contribue faiblement à l'exposition d'origine tellurique à laquelle les individus sont soumis de façon naturelle. L'activité moyenne du ^{226}Ra dans la roche est de quelques dizaines de Becquerels par kilogramme, mais elle peut être mille fois supérieure dans les sols ou les zones riches en minerai d'uranium. La concentration de ^{226}Ra peut être importante dans les eaux d'infiltration des mines d'uranium. Le ^{226}Ra produit un gaz radioactif, le radon, qui peut conduire à des doses importantes de rayonnement dans les habitations. La combustion du charbon peut être une autre voie de dissémination du radium, et la teneur en ^{226}Ra des cendres de charbon est de l'ordre de 120 $Bq.kg^{-1}$.

III. UTILISATIONS INDUSTRIELLES ET MEDICALES

Le radium, premier radioélément mis en évidence, a été largement utilisé pendant plus de 60 ans dans les domaines médicaux et industriels. On évoque souvent des utilisations étonnantes du radium (soda au radium, pommades au radium…), mais les principales applications ont été thérapeutiques (brachythérapie avec des aiguilles de radium). Parallèlement, le ^{226}Ra a été utilisé en raison de ses qualités photo-luminescentes dans les peintures destinées à l'horlogerie, à l'aviation et aux dispositifs de signalisation de secours. Le radium a enfin été utilisé pour la conception de détecteurs de fumée et de paratonnerres. Depuis 1960, l'utilisation du radium est désormais abandonnée, mais il subsiste dans le milieu médical des quantités non négligeables et mal localisées.

IV. TRANSFERT A L'ENVIRONNEMENT

	Activité ^{226}Ra ($Bq.kg^{-1}$)
Engrais phosphatés	10-500
Charbon	3-30
Aliments (blé, légumes…)	0,02-0,08
Noix du Brésil	500

(Données OPRI)

	Activité ($Bq.l^{-1}$)
Eau de rivière	0,07 (^{226}Ra et descendants)
Eau minérale	1-2 (^{226}Ra et ^{222}Rn)

[Gambini et al., 1997]

V. METROLOGIE ENVIRONNEMENTALE

- **Dans un échantillon de sol ou de produits végétaux ou animaux :**

Spectrométrie gamma : le radium est mesuré directement, en association avec ses descendants à vie courte, ^{214}Pb et ^{214}Bi, après mise à l'équilibre de l'échantillon pendant un mois.

- **Dans les eaux :**

Pour les eaux naturelles faiblement chargées : mesure par émanométrie du radon (^{222}Rn). Le radon dissous dans l'eau est dégazé par bullage et récupéré dans des fioles scintillantes pour effectuer la mesure.

- **Pour les eaux fortement contaminées :**

Spectrométrie gamma.

VI. EXPOSITION EXTERNE

Les coefficients de dose efficace du ^{226}Ra et de chacun de ses descendants sont issus du rapport n°12 du Federal Guidance (1993), et sont valables quel que soit l'âge de l'individu exposé. Ils ont été sommés pour obtenir les coefficients de dose du ^{226}Ra et de ses descendants à l'équilibre.

	Dose efficace
Panache	$8{,}86.10^{-14}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)
Dépôt	$1{,}65.10^{-15}$ (Sv /s) / (Bq/m^2)
Immersion dans l'eau	$1{,}98.10^{-16}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)
Dépôt en profondeur	$6{,}00.10^{-17}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)

VII. CONTAMINATION EXTERNE DE LA PEAU

Pour le ^{226}Ra **pur**, contamination homogène superficielle de 1000 Bq.cm^{-2} de peau délivre un débit de dose équivalente à l'épiderme (couche superficielle de la peau) de $4{,}5.10^{-5}$ Sv.h^{-1} [Chaptinel, 1988].

VIII. EXPOSITION INTERNE

VIII.1 BIOCINETIQUE

Le radium est un élément transférable à l'homme selon les mêmes voies métaboliques que le calcium : le site principal de dépôt et de rétention est l'os. A noter que la période de rétention dans la partie centrale de l'os est plus longue qu'à la surface osseuse.

La période biologique du radium dans l'organisme entier est de 900 jours, et dans les os de 5,5 ans.

[Pour plus de renseignements : voir logiciel « Calliope », 1999]

VIII.2 RADIOTOXICITE

Groupe de radiotoxocité : 1 (très forte)

(décret du 88-521 du 18/ 04/ 88)

VIII.3 EFFETS BIOLOGIQUES

Compte tenu de la biocinétique du radium, les lésions radio-induites sont essentiellement des cancers osseux. Les cancers des sinus, observés après absorption du ^{226}Ra, seraient liés à la diffusion du ^{222}Rn dans les cavités aériennes [Galle, 1997].

VIII.4 MESURE

^{226}Ra	**Méthode de mesure**		**Limite de détection**
	Spectrométrie γ in vivo	Corps entier	1000 Bq
	Spectrométrie α	Urine	10 mBq.l^{-1}

La mesure du corps entier par spectrométrie γ n'est ni adaptée à la surveillance spéciale (mise en place à la suite d'une exposition individuelle connue ou suspectée), ni à celle de routine. Les mesures par spectrométrie α nécessitent une préparation chimique préalable ; elles sont adaptées à la surveillance spéciale.

VIII.4 COEFFICIENTS DE DOSE

Pour le public, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** pour l'adulte et jusqu'à l'âge de **70 ans** pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de **0,9 m^3.h^{-1}** et de **0,2 m^3.h^{-1}**.

^{226}Ra seul		**Dose efficace (Sv/Bq)**	
		Adulte	**Enfant (1-2 ans)**
Inhalation	Aérosol (type M) AMAD = 1 µm	3,5.10^{-6}	1,1.10^{-5}
Ingestion		2,8.10^{-7}	9,6.10^{-7}

^{226}Ra et ses descendants à l'équilibre		**Dose efficace (Sv/Bq)**	
		Adulte	**Enfant (1-2 ans)**
Inhalation	Aérosol (type M) AMAD = 1 µm	8,0.10^{-6}	2,6.10^{-5}
Ingestion		2,2.10^{-6}	1,3.10^{-5}

Pour le travailleur, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de 50 ans et un débit respiratoire moyen égal à **1,2 m^3.h^{-1}**.

^{226}Ra seul		Dose efficace (Sv/Bq)
		Travailleur
Inhalation	Aérosol (type M) AMAD = 5 µm	$2{,}2.10^{-6}$
Ingestion		$2{,}8.10^{-7}$

IX. PROTECTION DES TRAVAILLEURS

IX.1 INDIVIDUELLE

De par leur nature (sels, poudres) et leur présentation (objets « hétéroclites »), certaines sources de ^{226}Ra peuvent présenter un risque de contamination non négligeable au cours du temps en raison d'un défaut de confinement ou d'une mauvaise utilisation. Il est recommandé de prévoir alors : un contrôle de l'exposition externe à l'aide d'un radiamètre, une détection de la contamination surfacique avant et pendant toute manipulation, une manipulation avec des gants de protection voire un appareil de protection des voies respiratoires (APVR).

IX.2 COLLECTIVE

Atténuation des photons γ par écrans de plomb : 46 mm pour une atténuation d'un facteur 10.

X. ACCIDENT

X.1 REPONSE MEDICALE

Prescription de substances :

- qui stimulent l'excrétion : chlorure d'ammonium (6 g par jour),
- qui réduisent l'absorption intestinale : sulfate de magnésium, sulfate de baryum ou phosphate d'aluminium [OPRI, 1997].

Les brûlures cutanées doivent être traitées comme des brûlures classiques.

XI. TEXTES REGLEMENTAIRES GENERAUX

- Les limites annuelles de dose de la Directive Européenne n°96/29/EURATOM du 13 mai 1996 sont les suivantes :

	Public	Travailleur
Dose efficace	1 mSv	100 mSv/ 5 ans consécutifs et au plus 50mSv/an
Dose équivalent à la peau	50 mSv	500 mSv

- Brochure du Journal Officiel (J.O.) n°1420 : protection contre les rayonnements ionisants. Ce document rassemble tous les textes législatifs et réglementaires de radioprotection et notamment :
  - Le décret n° 88-521 du 18 avril 1988 modifiant le décret du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de radioprotection ;
  - Le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 modifié relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants et ses textes d'application.
- Directive Européenne n°96/29/EURATOM adoptée le 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.

XII. BIBLIOGRAPHIE

- Calliope, CD-Rom, Collection IPSN, 1999.
- CHAPTINEL Y., DURAND F., PIECHOWSKI J., MENOUX B., Dosimétrie et thérapeutique des contaminations cutanées, Rapport CEA-R-5441, 1988.
- DELACROIX D., GUERRE J.P., LEBLANC P., Radionucléides et Radioprotection, Saclay, CEA, Paris,1994.
- Federal Guidance Report n°12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. Oak Ridge National Laboratory, 1993.
- IPSN/DSMR-DPRE : Fiches de radiotoxicité des matières transportées en sources scellées Radium226 et ses descendants, 3/02/2000.
- GALLE P., Toxiques nucléaires, Paris, Masson (2e édition), 1997.
- GAMBINI D.J., GRANIER R., Manuel de radioprotection, Editions Lavoisier, 1997.
- Nucléides, CD-Rom, Collection CEA, 1999.
- OPRI, Intervention médicale en cas d'accident radiologique, Rapport du Conseil Scientifique OPRI, 1997.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, New York, United Nations, 1993.

Rédacteurs de la Fiche : P. Bérard, B. Le Guen, M.L. Perrin, E. Gaillard-Lecanu,
V. Chambrette, J. Brenot (DPHD), D. Robeau (IPSN/Dir).

Vérificateur : B. Cessac (DPRE)

Fiche radionucléide **Aspects médicaux et sanitaires**

$^{232}_{90}Th$

1.6 THORIUM 232 ET SES DESCENDANTS A L'EQUILIBRE

I. CARACTERISTIQUES

I.1 CHIMIQUES

Le thorium est le deuxième élément de la série des actinides. Certaines de ses propriétés le rapprochent, soit du titane, soit du cérium, soit du plutonium.

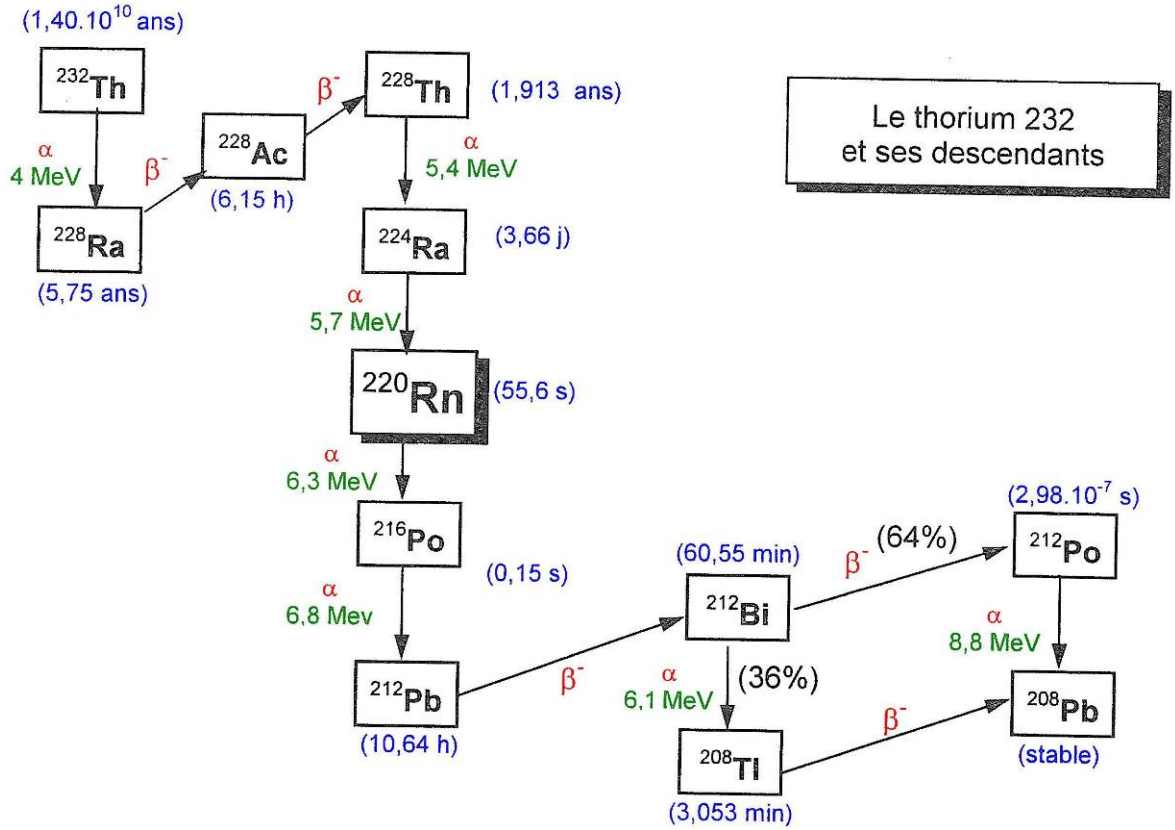
I.2 NUCLEAIRES

Le thorium n'existe que sous forme radioactive et se rencontre dans la plupart des grandes familles de radionucléides naturels et dans celles des transuraniens. Il présente 13 isotopes dont le principal est le ^{232}Th, émetteur de rayonnement alpha. Il donne naissance à de nombreux produits de filiation dont l'actinium 228, émetteur de rayonnement gamma.

[Voir Base de données " Nucléides ", 1999]

Période radioactive	$1,41.10^{10}$ ans
Activité massique	$4,06.10^{3}$ Bq.g^{-1}
Poids du Becquerel	$2,44.10^{-4}$ g.Bq^{-1}
Emissions principales	α_1 (E = 4013 keV) : 77 % α_2 (E = 3954 keV) : 23 %

Les descendants du ^{232}Th apparaissent dans la chaîne de désintégrations suivante :



II. ORIGINE

II.1 NATURELLE

Le thorium est un métal gris découvert en 1828 par le chimiste suédois Berzelius. Pratiquement 100% du thorium naturel est constitué de l'isotope 232. Le thorium est trois à quatre fois plus abondant dans la couche terrestre que l'uranium. Sa teneur moyenne est de 9 à 12 grammes par tonne de sol, ce qui correspond à une radioactivité de quelques dizaines de Becquerels par kilogramme. Il est extrait surtout de la monazite, minerai qui contient de 3 à 9 % d'oxyde de thorium (thorine). Les principaux gisements de monazite sont en Inde et au Brésil. On en trouve également dans des pays comme l'Australie, l'Indonésie, la Malaisie ou Madagascar. Mais le principal producteur mondial, depuis 1966, est l'Afrique du Sud.

Dans le milieu naturel, le ^{232}Th est toujours à l'équilibre avec ses descendants.

III. UTILISATIONS INDUSTRIELLES ET MEDICALES

Entre 1928 et 1955, le thorium a été utilisé dans le domaine **médical**. Son application la plus connue a été le Thorotrast (injection de dioxyde de thorium) produit de contraste utilisé en radiologie principalement pour les artériographies. Entre 1944 et 1951, le thorium a aussi été employé pour le traitement de certaines maladies comme la tuberculose ou la spondylarthrite ankylosante.

Dans l'**industrie**, le thorium est utilisé depuis longtemps pour ses propriétés physico-chimiques (la thorine a des propriétés céramiques remarquables). Il l'est aussi pour ses propriétés nucléaires (le ^{232}Th est fertile). Actuellement, ses principales applications sont dans :

- **l'industrie aéronautique** : il sert à renforcer la résistance thermique et la tenue à l'oxydation de métaux ;
- **l'électronique** : associée à différents métaux, la thorine (oxyde de thorium) forme des alliages céramique/métal employés comme sources d'électrons. La thorine entre également dans la composition des filaments de tungstène des lampes à incandescence ;
- **la production de céramiques et de matériaux réfractaires** : la thorine est notamment utilisée pour la fabrication de creusets servant à la coulée de métaux en fusion et comme composant de résistances pour fours à haute température ;
- **l'industrie chimique** : la thorine sert de catalyseur dans des réactions d'hydrogénation et de déshydrogénation (craquage des pétroles);
- **l'industrie nucléaire** : le thorium 232, associé à l'uranium 233, est utilisé comme combustible dans certains réacteurs nucléaires, principalement au Canada et en Inde.

IV. TRANSFERT A L'ENVIRONNEMENT

Les eaux de mer ne renferment qu'une faible proportion de thorium, environ 1.10^{-5} $g.l^{-1}$. Ces faibles teneurs s'expliquent par le fait que les sédiments marins absorbent le thorium dissous. La teneur en thorium de ces sédiments est presque 500 fois supérieure à celle de l'eau de mer [Laroche, 1998]. Le tableau suivant donne les concentrations du thorium ou de ses descendants dans différents milieux.

	^{232}Th	^{228}Ra	^{228}Th
Sols ($Bq.kg^{-1}$)	Valeurs typiques 2-190 (a) 7-50 (b) 25 à 28 en moyenne		
Eau ($mBq.l^{-1}$) (c)	0,03 ± 0,03 (Loire) 10 – 11 (Seine)		
Sédiment ($Bq.kg^{-1}$ poids sec) (c)	16 ± 9 (Seine) 55 ± 12 (Loire)		
Poisson ($Bq.kg^{-1}$ poids frais) (c)	0,6 ± 0,3 (Loire) 1,1 ± 0,7 (Seine)		
Eaux minérales ($mBq.l^{-1}$) (d) Volvic Perrier St Yorre Badoit		 42,7 500 170	 28 14

(a) Rannou A. , 1999

(b) de Choudens et al., 1997

(c) Lambrechts et al., 1992

(d) Métivier et al., 1997

V. METROLOGIE ENVIRONNEMENTALE

Différentes techniques peuvent être adoptées pour la mesure du ^{232}Th :

- **mesure directe**

  Thorium par ICPMS.

- **mesure indirecte**

  Spectrométrie gamma centrée sur l'^{228}Ac.

  Scintillation liquide et spectrométrie gamma centrée sur le ^{234}Th.

  Spectrométrie alpha centrée sur le ^{230}Th.

VI. EXPOSITION EXTERNE

Les coefficients de dose efficace sont issus du rapport n°12 du Federal Guidance (1993), et sont valables quel que soit l'âge de l'individu exposé.

	Dose efficace
Panache	$8{,}72.10^{-18}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)
Dépôt	$5{,}51.10^{-19}$ (Sv /s) / (Bq/m^2)
Immersion dans l'eau	$1{,}99.10^{-20}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)

La famille du ^{232}Th contribue environ au tiers de l'exposition externe naturelle d'origine tellurique, soit environ 0,15 mSv/an (UNSCEAR, 1993) à égalité avec la famille de l'^{238}U et avec le ^{40}K (Rannou A., 1999).

VII. CONTAMINATION EXTERNE DE LA PEAU

Pour le ^{232}Th **pur** une contamination homogène superficielle de 1000 Bq.cm^{-2} de peau délivre un débit de dose équivalente à l'épiderme (couche superficielle de la peau) de $5{,}1.10^{-6}$ Sv.h^{-1} [Chaptinel, 1988].

VIII. EXPOSITION INTERNE

VIII.1 BIOCINETIQUE

La pénétration du thorium dans l'organisme peut se faire par ingestion ou inhalation de poussières, plus rarement par blessure. Dans l'organisme, le thorium se fixe dans l'os à raison de 60 % de la quantité inhalée ou ingérée par l'individu. Chez l'enfant, l'assimilation par l'organisme est 4 à 8 fois supérieure à celle de l'adulte, ce qui se traduit par une plus grande fixation osseuse. Absorbé dans le sang, le thorium a pour principaux sites de dépôt, le foie et le squelette. La Publication 67 de la CIPR précise les taux de transfert spécifiques.

Le thorium est relativement abondant, mais sa concentration très faible dans la biosphère rend négligeable sa contribution à l'exposition naturelle de l'homme. L'absorption quotidienne due à l'irradiation naturelle a été estimée, pour un adulte, à 3.10^{-5} Bq par inhalation et à 4.10^{-3} par ingestion. Les 4 10^{-3} Bq ingérés par jour correspondent à environ 2 Bq/an qui donnent une dose efficace annuelle de 3 µSv/an. (Gambini D.J. et al.,

1997). Une fraction de cette radioactivité absorbée est éliminée par les voies naturelles ; le reste se fixe essentiellement dans les os, le foie et les poumons.

[Pour plus de renseignements : voir logiciel " Calliope ", 1999]

VIII.2 RADIOTOXICITE

Groupe de radiotoxicité : 2 (forte)

(décret du 88-521 du 18/04/88)

Le thorium présente une toxicité chimique comparable à celle de l'uranium. En revanche, la toxicité radiologique du thorium naturel est supérieure à celle de l'uranium naturel. Le risque dépend de la forme physico-chimique et de la concentration. L'apparition des cancers liés au thorium est généralement expliquée par son rayonnement alpha.

VIII.3 EFFETS BIOLOGIQUES

Lors de son utilisation médicale, le Thorotrast (solution injectable par voie intraveineuse contenant 20 % à 25 % de thorium métal sous forme d'oxyde) a été injecté à plusieurs millions de patients. Les fortes doses résultant de cette utilisation et les millions de cas concernés permettent aujourd'hui de connaître de façon précise les risques encourus dans ces conditions d'utilisation, et leurs conséquences. Chez ces patients, on constate la présence de grains de thorium accumulés dans des organes tels que le foie, le rein, la rate, la moelle osseuse. Ils soumettent ainsi ces tissus pendant des années à une forte irradiation alpha responsable essentiellement de cancers du foie, ainsi que de cancers du poumon, plus rares. Le thorium augmente également le risque de leucémie par sa présence dans la moelle rouge des os. La plupart de ces cancers sont survenus plus de 20 ans après l'injection.

VIII.4 MESURE

^{232}Th	Méthode de mesure		Limite de détection
	Spectrométrie α	Urine	10 mBq.$^{l-1}$
		Fèces	10 mBq

Les mesures par spectrométrie α nécessitent une séparation chimique préalable. Les limites de détection fournies ci-dessus sont insuffisantes dans certains cas : voir Bases de données « Calliope », 1999.

Le ^{232}Th ne peut être détecté par spectrométrie in vivo.

VIII.5 COEFFICIENTS DE DOSE

Pour le public, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** pour l'adulte et jusqu'à l'âge de **70 ans** pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de **0,9 m^3.h^{-1}** et de **0,2 m^3.h^{-1}**.

^{232}Th seul		Dose efficace (Sv/Bq)	
		Adulte	Enfant (1-2 ans)
Inhalation	Aérosol (type S) AMAD = 1 µm	$2{,}5.10^{-5}$	5.10^{-5}
Ingestion		$2{,}3.10^{-7}$	$4{,}5.10^{-7}$

^{232}Th et ses descendants à l'équilibre		Dose efficace (Sv/Bq)	
		Adulte	Enfant (1-2 ans)
Inhalation	Aérosol AMAD = 1µm	7.10^{-5}	2.10^{-4}
Ingestion		1.10^{-6}	$6{,}9.10^{-6}$

Pour le travailleur, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM.Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans**, un débit respiratoire moyen égal à **1,2 $m^3.h^{-1}$**.

^{232}Th seul		Dose efficace (Sv/Bq)
		Travailleur
Inhalation	Aérosol (type M) AMAD = 5µm	$2{,}9.10^{-5}$
Ingestion		$2{,}2.10^{-7}$

IX. PROTECTION DES TRAVAILLEURS

L'utilisation **industrielle** du thorium, comme celle de toutes les substances radioactives, est soumise à déclaration ou autorisation selon les quantités détenues, sauf si la radioactivité est inférieure à 50 000 Becquerels. Les installations qui en contiennent peuvent être classées « ICPE » (installation classée pour la protection de l'environnement).

Le risque pour les travailleurs est plus important si le produit est sous forme pulvérulente (poudre ou produit massif en cours d'usinage -limage, soudure).

Dans l'industrie nucléaire, les travailleurs sont soumis à une surveillance spécifique.

X. ACCIDENT

Le ^{232}Th à l'état naturel ne constitue pas un risque significatif pour l'homme, ni par exposition externe (émetteur gamma de faible énergie), ni par exposition interne (incorporation de traces). En situation anormale, le risque dépend de la forme physicochimique.

X.1 REPONSE MEDICALE

En cas de contamination interne, des adsorbants peuvent être utilisés pour réduire l'absorption intestinale et l'EDTA ou le DTPA peuvent être préconisés pour stimuler l'excrétion [Bhattacharyya, 1995]. Le traitement est l'administration intraveineuse de 1 g/jour de DTPA calcique les premiers jours, suivie de l'administration intraveineuse de 1 g/jour de DTPA zincique (moins efficace mais moins toxique). Lorsque le thorium est inhalé, on peut envisager l'inhalation de DTPA par spinhaler.

Les brûlures cutanées doivent être traitées comme des brûlures classiques.

XI. TEXTES REGLEMENTAIRES GENERAUX

- Les limites annuelles de dose de la Directive Européenne n°96/29/EURATOM du 13 mai 1996 sont les suivantes :

	Public	**Travailleur**
Dose efficace	1 mSv	100 mSv/ 5 ans consécutifs et au plus 50mSv/an
Dose équivalente à la peau	50 mSv	500 mSv

- Brochure du Journal Officiel (J.O.) n°1420 : protection contre les rayonnements ionisants. Ce document rassemble tous les textes législatifs et réglementaires de radioprotection et notamment :
  - Le décret n° 88-521 du 18 avril 1988 modifiant le décret du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de radioprotection ;
  - Le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 modifié relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants et ses textes d'application.
- Directive Européenne n°96/29/EURATOM adoptée le 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.

XII. BIBLIOGRAPHIE

- BHATTACHARYYA MH., BREITENSTEIN BD., METIVIER H., MUGGENBURG BA., STRADING GN., VOLF V., Traitement de la contamination interne accidentelle des travailleurs, Editions de Physique, Paris, 1995.
- Calliope, CD-Rom, Collection IPSN, 1999.
- CHANTEUR J., Le thorium : Physico-chimie, physio-pathologie, risques et prévention, Séminaire des Hôpitaux de Paris, 7, 27-28, 85-855, 1994.
- CHAPTINEL Y., DURAND F., PIECHOWSKI J., MENOUX B., Dosimétrie et thérapeutique des contaminations cutanées, Rapport CEA-R-5441, 1988.
- DE CHOUDENS H., TROESCH G., Radioprotection dans les installations nucléaires. Editions Lavoisier, collection Technique et Documentation, 1997.
- Federal Guidance Report n°12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. Oak Ridge National Laboratory, 1993.

- GALLE P., Toxiques nucléaires, Paris, Masson (2e édition), 1997.
- GAMBINI D.J., GRANIER R., Manuel pratique de radioprotection, Editions Lavoisier, collection Technique et Documentation, 1997
- LAMBRECHTS A., FOULQUIER L., GARNIER-LAPLACE J., Natural radioactivity in the aquatic components of the main French rivers, in Proceedings of the Fifth international Symposium on the natural radiationenvironment, Salzburg, Austria, September 22-28, 1991. Radiation Protection and Dosimetry, Vol 45, Nos 1-4, 1992.
- LAROCHE P., Le thorium : risques pour les travailleurs, surveillance et radioprotection, Thèse de Doctorat de l'Université Paris V, 1998.
- METIVIER H., ROY M., Dose efficace lié à la consommation d'eau minérale naturelle par l'adulte et le nourrisson. Radioprotection, Vol. 32, n°4, pp 491 à 499.
- Nucléides, CD-Rom, Collection CEA, 1999.
- RANNOU A., Connaissance actuelle des sources d'irradiation naturelle. Radioprotection, Vol. 34, n°4, pp 505 à 519, 1999.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, New York, United Nations, 1993.

Rédacteurs de la Fiche : P. Bérard, B. Le Guen, M.L. Perrin, A. Desprès,
E. Gaillard-Lecanu, V. Chambrette, J. Brenot (DPHD).

Vérificateur : B. Cessac (DPRE)

Fiche radionucléide **Aspects médicaux et sanitaires**

$^{241}_{95}Am$

1.7 AMERICIUM 241

I. CARACTERISTIQUES

I.1 CHIMIQUES

L'américium est un métal argenté, fortement électronégatif. Il fait partie de la famille des actinides et s'oxyde rapidement en présence d'oxygène. En solution aqueuse, il existe aux états d'oxydation III, IV, V, VI et VII ; l'état trivalent est le plus stable. Aux pH biologiques, les composés de l'américium sont peu solubles et ont une forte tendance à l'hydrolyse.

I.2 NUCLEAIRES

L'^{241}Am est le plus connu des 13 principaux isotopes artificiels de l'américium. Il descend du ^{241}Pu par désintégration β^-.

[Voir Base de données « Nucléides », 1999]

Période radioactive	432,2 ans
Activité massique	$1,27.10^{11}$ Bq.g^{-1}
Poids du Becquerel	$7,87.10^{-12}$ g.Bq^{-1}
Emissions principales	α_1 (E= 5486 keV) : 85% α_2 (E = 5443 keV) : 13% γ (E = 60 keV) : 36% X (E_{moy} = 16 keV) : 38%

II. ORIGINE

II.1 NATURELLE

- sans objet -

II.2 ARTIFICIELLE

Emissions par les installations nucléaires

Il est produit artificiellement dans les réacteurs nucléaires. Les rejets dans l'environnement ont principalement lieu lors du retraitement des combustibles irradiés. Les rejets de ^{241}Am dans le milieu marin étaient de $3,5.10^9$ Bq en 1999 pour l'usine de retraitement de La Hague et de 7.10^{10} Bq en 1996 pour l'usine de Sellafield. Les rejets gazeux sont très inférieurs (d'un facteur 10 000 au moins).

III. UTILISATIONS INDUSTRIELLES ET MEDICALES

Les sources scellées de ^{241}Am sont constituées d'un mélange d'oxyde d'américium et de silice (Am_2O_3 + SiO_2). Elles sont conditionnées sous une double enveloppe cylindrique en acier inoxydable.
Les dimensions des sources sont de l'ordre du centimètre. Elles sont utilisées comme jauges de niveau et pour l'étalonnage d'appareils de mesure. Elles équipent des détecteurs ioniques de fumée et des stimulateurs cardiaques. Par ailleurs, l'Américium est souvent employé avec le Béryllium pour la production de sources neutroniques utilisées en recherche dans certains irradiateurs et en génie civil dans certains humidimètres.
Dans le passé, le ^{241}Am a été utilisé pour la conception de paratonnerres dont la vente est interdite en France depuis l'arrêté du 11 octobre 1983. Il a aussi été employé en médecine pour le marquage anatomique ; cette pratique est aujourd'hui abandonnée, mais il reste quelques sources chez les utilisateurs.

[cf. Fiche IPSN]

IV. TRANSFERT A L'ENVIRONNEMENT

Après dépôt dans l'environnement, l'américium est susceptible d'être incorporé dans tous les constituants de la chaîne alimentaire et de présenter diverses formes chimiques plus ou moins solubles.

V. METROLOGIE ENVIRONNEMENTALE

La mesure de radioactivité dans l'environnement se fait par spectrométries α et γ après prélèvement d'échantillons.

VI. EXPOSITION EXTERNE

Les coefficients de dose efficace sont issus du rapport n°12 du Federal Guidance (1993), et sont valables quel que soit l'âge de l'individu exposé.

	Dose efficace
Panache	$8{,}18.10^{-16}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)
Dépôt	$2{,}75.10^{-17}$ (Sv /s) / (Bq/m^2)
Immersion dans l'eau	$1{,}88.10^{-18}$ (Sv /s) / (Bq/m^3)

VII. CONTAMINATION EXTERNE DE LA PEAU

Une contamination homogène superficielle de 1 000 $Bq.cm^{-2}$ de peau délivre un débit de dose équivalente à l'épiderme (couche superficielle de la peau) de $1{,}9.10^{-5}$ $Sv.h^{-1}$ [INRS, fiche ^{241}Am].

VIII. EXPOSITION INTERNE

VIII.1 BIOCINETIQUE

L'inhalation du ^{241}Am correspond au mode de contamination le plus courant. De nombreuses études montrent la nécessité de connaître les cinétiques de dissolution et de translocation des composés inhalés. A partir de

données humaines et animales, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) classe l'ensemble des composés de l'américium dans le type de solubilité M.

Pour ce qui concerne l'**ingestion**, l'américium est faiblement absorbé par le tractus gastro-intestinal de l'homme adulte. La complexation du radionucléide avec diverses formes biologiques n'a que peu d'effet sur son absorption. Les taux de transfert calculés dans les diverses espèces animales sont similaires à ceux trouvés pour les autres actinides, et l'américium est celui pour lequel l'absorption est la plus faible. Les recommandations de la CIPR (1986) proposent un coefficient de transfert f_1 de 5.10^{-4} pour l'homme, utilisable pour toutes les formes chimiques.

Le **dépôt** d'américium à l'intérieur d'une plaie présente un risque de diffusion du radionucléide et de contamination. En règle générale, les composés solubles gagnent le sang pour être ensuite redistribués alors que les composés insolubles sont éliminés via les vaisseaux lymphatiques et conduisent à une accumulation dans les ganglions lymphatiques (Galle, 1997). L'américium est un composé moyennement transférable, qui se dépose principalement dans le squelette, le foie et les gonades, quelle que soit l'espèce considérée. A ce titre, il a un comportement proche de celui des autres éléments transuraniens. Il se distingue toutefois du plutonium par un temps de rétention dans les organes moins important et une toxicité moins prononcée. L'élimination de l'américium du foie dépend fortement des espèces. Chez les souris, rats, macaques et babouins, l'excrétion est souvent biphasique, 80 % du radionucléide étant éliminé avec des périodes comprises entre 4 et 200 jours. Chez les chiens, hamsters et cochons, l'élimination suit une seule phase avec des périodes biologiques de plusieurs années. Les données humaines sur l'élimination hépatique proviennent de l'autopsie de travailleurs contaminés aux postes de travail et correspondent à des périodes de 2,5 ans. Ces valeurs sont très différentes de celles proposées par la CIPR qui indique que le foie élimine l'américium avec une période biologique de 20 ans.

[Pour plus de renseignements : voir logiciel « Calliope », 1999]

VIII.2 EFFETS BIOLOGIQUES

Il n'existe, parmi le petit nombre de travailleurs ayant incorporé de l'^{241}Am, aucune évidence d'un raccourcissement de la durée de vie ou d'une transformation maligne, attribuables à cette contamination. Une diminution du nombre de lymphocytes (avec anomalies cytogénétiques), des plaquettes et des neutrophiles, sans effet clinique a pu être observée chez un patient en 1976 lors d'une explosion chimique dans une opération utilisant l'^{241}Am [Breitenstein, 1989]. Des études animales approfondies ont montré que les effets biologiques peuvent se manifester principalement dans le poumon, l'os, le foie, le sang et les ganglions lymphatiques, mais généralement à des doses supérieures à celles reçues par des individus. Aucun effet n'a été mis en évidence dans le tube digestif, après ingestion ou inhalation [Stather, 1978]. Des études sur des travailleurs après décès et autopsie ont montré des signes de fibrose au niveau de la moelle [Galle, 1997].

VIII.3 RADIOTOXICITE

Groupe de radiotoxicité : 1 (très forte)

(décret du 88-521 du 18/04/88)

VIII.4 MESURE

^{241}Am	Méthode de mesure		Limite de détection
	Spectrométrie X,γ in vivo	Poumons	20 Bq
		Squelette	20 Bq
	Spectrométrie α	Urine	1.10^{-3} Bq.l^{-1}
	d'échantillons biologiques	Fèces	1.10^{-3} Bq

Les mesures par spectrométrie α nécessitent une séparation chimique préalable. Elles ont des limites de détection suffisantes, que ce soit pour la surveillance spéciale (mise en place à la suite d'une exposition individuelle connue ou suspectée) ou pour la surveillance de routine. La mesure in vivo de l'^{241}Am dans les poumons a une sensibilité suffisante pour permettre de détecter une incorporation unique de l'ordre de la limite annuelle (LAI). Les mesures in vivo de ^{241}Am dans les poumons et dans les os, n'ont pas des sensibilités suffisantes pour la surveillance de routine.

VIII.5 COEFFICIENTS DE DOSE

Pour le public, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans** pour l'adulte et jusqu'à l'âge de **70 ans** pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de **0,9 m^3.h^{-1}** et de **0,2 m^3.h^{-1}**.

		Dose efficace (Sv/Bq)	
		Adulte	**Enfant (1-2 ans)**
Inhalation	Aérosol (type M) AMAD = 1 µm	$4{,}2.10^{-5}$	$6{,}9.10^{-5}$
Ingestion		$2{,}0.10^{-7}$	$3{,}7.10^{-7}$

Pour le travailleur, les données sont issues de la Directive Européenne 96/29/EURATOM.Elles considèrent un temps d'intégration de **50 ans**, un débit respiratoire moyen égal à **1,2 m^3.h^{-1}**.

		Dose efficace (Sv/Bq)
		Travailleur
Inhalation	Aérosol (type M) AMAD = 5 µm	$2{,}7.10^{-5}$
Ingestion		$2{,}0.10^{-7}$

IX. PROTECTION DES TRAVAILLEURS

Pour la protection des travailleurs, des enceintes blindées sont requises.

X. ACCIDENT

X.1 HISTORIQUE

L'inhalation de l'^{241}Am correspond au mode de contamination accidentelle le plus courant.

Comme exemple d'accident par dépôt percutané, on peut rapporter qu'un travailleur a reçu, lors de l'explosion d'une boîte à gants, l'équivalent de $2{,}2.10^{8}$ Bq d'^{241}Am sur le visage en 1976 sur le site de Hanford (USA). Le dépôt sur le visage a été estimé à 4.10^{4} Bq et le travailleur a été immédiatement traité par administration de DPTA (acide diethylène triamine pentaacétique) [Breitenstein, 1989].

X.2 REPONSE MEDICALE

Le traitement préconisé en cas de contamination par l'américium est l'administration de DTPA sous forme de sel calcique ou zincique, à raison de 1 g pour une personne de 70 kg (30 µmole par kg de masse corporelle). Ceci permet d'accélérer l'élimination naturelle de l'américium, quelles que soient la voie d'incorporation et la forme chimique initiale. L'excrétion est d'autant plus efficace que l'administration est précoce mais elle dépend de l'organe considéré : le DTPA épure facilement le sang et les liquides extra-cellulaires, et possède une certaine action sur les dépôts récents dans l'os et autres tissus [Bhattacharyya et al., 1995].

X.3 REPONSE SANITAIRE

Dans l'Union Européenne, des normes de commercialisation ont été instaurées depuis 1987 pour être applicables dans l'éventualité d'un accident futur [Réglements Euratom 3954/87, 2218/89 et 770/90].

Denrées alimentaires prêtes à la consommation				Aliments pour le bétail prêts à la consommation		
Aliment pour le nourrisson	Produits laitiers	Autre denrée alimentaire	Liquide destiné à la consom-mation	Porc	Volaille Agneau Veau	Autres
1 Bq.kg^{-1}	20 Bq.kg^{-1}	80 Bq.kg^{-1}	20 Bq.kg^{-1}	1250 Bq.kg^{-1}	2500 Bq.kg^{-1}	5000 Bq.kg^{-1}

XI. TEXTES REGLEMENTAIRES GENERAUX

- Les limites annuelles de dose de la Directive Européenne n°96/29/EURATOM du 13 mai 1996 sont les suivantes :

	Public	**Travailleur**
Dose efficace	1 mSv	100 mSv/ 5 ans consécutifs et au plus 50mSv/an
Dose équivalent à la peau	50 mSv	500 mSv

- Brochure du Journal Officiel (J.O.) n°1420 : protection contre les rayonnements ionisants. Ce document rassemble tous les textes législatifs et réglementaires de radioprotection et notamment :
  - Le décret n° 88-521 du 18 avril 1988 modifiant le décret du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de radioprotection ;
  - Le décret n° 86-1103 du 2 octobre 1986 modifié relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants et ses textes d'application.
- Directive Européenne n°96/29/EURATOM adoptée le 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.

XII. BIBLIOGRAPHIE

- BHATTACHARYYA MH., BREITENSTEIN BD., METIVIER H., MUGGENBURG BA., STRADLING GN., VOLF V., Traitement de la contamination accidentelle des travailleurs, Editions de Physique, Paris, 1995.
- BREITENSTEIN BD., PALMER HE., Lifetime follow-up of the 1976 americium accident victim, Radiation Protection Dosimetry, 26 (1/4), p317-322, 1989
- Calliope, CD-Rom, Collection IPSN, 1999.
- DELACROIX D., GUERRE J.P., LEBLANC P., Radionucléides et Radioprotection, Saclay, CEA, Paris, 1994.
- Federal Guidance Report n°12, External exposure to radionuclides in air, water and soil. Oak Ridge National Laboratory, 1993.
- IPSN : Fiche sur les utilisations de l'Américium 241 sous forme de sources scellées, Note IPSN/99-2857 du 9/11/99
- IPSN/DSMR-DPRE : Fiches de radiotoxicité des matières transportées en sources scellées Américum 241, 3/02/2000.
- GALLE P., Toxiques nucléaires, Paris, Masson (2e édition), 1997.
- Nucléides, CD-Rom, Collection CEA, 1999.
- OPRI/INRS, Américium 241 : Fiche technique de radioprotection pour l'utilisation de radionucléides en sources scellées, 1996.
- STATHER JW., NENOT JC., Toxicité du plutonium, de l'américium et du curium, Paris, Technique et Documentation, 1978.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, New York, United Nations, 1993.

Rédacteurs de la Fiche : P. Bérard, M.L. Perrin, E. Gaillard-Lecanu,
V. Chambrette (DPHD)

Vérificateur : F. Paquet (DPHD)

Annexe 3 SOURCES D'INFORMATION UTILES

Pour l'étude historique d'un site

- Directions régionales de l'industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE)
- Centre des Archives du Monde du Travail (CAMT)
- Archives Départementales (AD)
- Institut Géographique National (IGN)
- Agences de l'Eau
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

Pour l'étude de vulnérabilité d'un site

- Dossier des exploitants/détenteurs comprenant :
  - des études d'impact du site, mais aussi des grands travaux proches de la zone d'étude (routes, autoroutes, TGV, barrages, ...).
  - la surveillance de l'environnement,
  - des études de diagnostic du site ou de ses environs proches.
  - Des études d'impact et de danger déposées lors des demandes d'autorisation d'une nouvelle installation classée pour la protection de l'environnement.
  - Des études déchets des installations classées pour la protection de l'environnement.
- Agences de l'eau : qualité des cours d'eau (analyses des eaux, des matières en suspension et des sédiments déposés) et des eaux souterraines, objectifs de qualité des masses d'eau, rejets industriels, réseau de suivi des niveaux piézométriques, documents SAGE - SDAGE.
- Directions Départementales de l'Action Sanitaire et Sociale (DDASS) : analyses réglementaires sur les captages d'alimentation en eau potable et les eaux de baignade, populations desservies par les captages d'alimentation en eau potable, études des périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable.
- Ministère en charge de l'Environnement : carte des risques naturels comprenant notamment les risques d'inondation par les cours d'eau, politique nationale de gestion des sites et sols "potentiellement" pollués, guides méthodologiques, Inventaire des Anciens Sites Industriels et Activités de Service (BASIAS), Base de données sur les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif (BASOL).
- Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du logement (DREAL) : dossiers Installations Classées dont dossiers de demande d'autorisation, études d'impact, bilan des émissions..., plans de Prévention des Risques d'Inondations (PPRI), réseaux Qualité de l'Air, localisation des zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF), sites classés ou inscrits, arrêtés de biotope, réserves naturelles,
- BRGM : renseignements géologiques et hydrogéologiques contenus dans la Banque de données du sous-sol (BSS), cartes géologiques, atlas hydrogéologiques, cartes régionales de vulnérabilité des eaux

souterraines, cartes de séismicité, cartes ZERMOS (Zones Exposées aux Risques de Mouvement du Sol et du sous-sol), Inventaires Historiques Régionaux des anciens sites industriels (BASIAS), publications dans le domaine de la gestion des sites et sols "potentiellement" pollués, guides méthodologiques.

- Directions Départementales de l'Equipement (DDE) : renseignements sur l'occupation des sols, inventaire des friches....
- Directions Départementales de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF) : Observatoire de la Qualité des Sols agronomiques (OQS).
- Services de la Navigation (SN) de Voies Navigable de France (VNF) : localisation des rejets dans les cours d'eau, débits et qualité des cours d'eau domaniaux, qualité des sédiments...
- Météo France : données climatologiques locales.
- Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) : données relatives aux populations et aux pratiques d'alimentation.
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) : base de données CIBLEX comportant des paramètres descriptifs de la population française (âge, sexe, budgets espace-temps et consommations alimentaires...) en fonction de l'occupation des sols (zones continentales, surfaces en eaux) et de l'usage type (résidentiel, professionnel, récréatif...), publications dans le domaine de la gestion des sites et sols "potentiellement" pollués, guides méthodologiques.
- Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA) : données relatives aux pratiques d'alimentation de la population française et à l'évaluation des risques alimentaires.
- Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) : (http://www.andra.fr)
- Archives départementales : archives versées par la préfecture concernant, en particulier, les déclarations d'activité ou de demande d'autorisation pour une nouvelle installation, les dossiers de dommages de guerre, les anciens documents cadastraux.
- Archives notariales et Bureau des hypothèques : servitudes d'utilités publics, projet d'intérêt général.
- Centre des Archive du Monde du Travail (CMAT) (www.archivesnationales.culture.gouv.fr/camt/),
- Directions Départementales des Services Vétérinaires (DDSV) : données relatives à la surveillance des contaminants alimentaires microbiologiques ou chimiques.
- Institut Géographique National (IGN) : cartes topographiques, photographies aériennes...,
- Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) : données relatives au Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS)...,
- Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) : données relatives aux populations, aux pratiques d'alimentation.
- Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) : Etudes déjà menées sur les sites (base de données MIMAUSA), données générales sur l'environnement (www.irsn.fr)
- Mairies ou Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) : archives municipales, usage des sols via documents d'urbanisme (PLU, SCOT), liste des établissements recevant du public, puits privés, Plans de Prévention des Risques (PPR), servitudes, Projets d'Intérêt Général (PIG).
- Missions Inter Services de l'Eau (MISE) : documents SAGE, SDAGE, Plans de Prévention des Risques d'Inondations (PPRI), données sur de la qualité des eaux de surface, sur les zones humides.

- Préfectures - Bureau en charge de l'Environnement : archives préfectorales, Plans de Prévention des Risques (PPR).
- Réseau des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air ATMO : bulletins de surveillance de l'air urbain.

En complément des éléments précédents, des fiches descriptives des sources d'information permettant d'accéder à des données utiles pour reconstituer l'historique des activités sur un site et à appréhender la vulnérabilité ou la sensibilité des milieux sont accessibles sur le site internet relatif aux outils de gestion des sites (potentiellement) pollués mis en place par le ministère en charge de l'environnement (http://www.sites-pollues.developpement-durable.gouv.fr/).

Annexe 4 PRINCIPAUX DOMAINES D'UTILISATION, ACTUELS OU PASSES, DE RADIONUCLEIDES

Les tableaux ci-après présentent, pour les radionucléides de période supérieure à l'année, les principales utilisations dans les différents secteurs industriels. Cette liste non exhaustive recouvre les principales activités mises en œuvre aujourd'hui ou dans le passé.

Les informations exploitées ont été tirées des références suivantes :

- « Les radioéléments et leurs utilisations », Collection CEA, Série Synthèses, Eyrolles 1980.
- « Inventaire national des déchets radioactifs », Observatoire de l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs, 1998.
- Gambini D.-J., Granier R., « Manuel pratique de radioprotection », Collection Techniques et Documentation, Editions Lavoisier, Paris 1997.
- Balestic F., « Rayonnements et traitements ionisants », Collection Physique Fondamentale et Appliquée, Editions Masson, Paris 1995.
- « Cours Post-universitaire de radioprotection » Volumes 1 et 2, Collection cours de formation n°5, Agence Internationale de l'Energie Atomique, AIEA, Vienne, Autriche, 1995.

La fréquence d'utilisation d'un radionucléide dans un secteur donné est figurée par différents pictogrammes détaillés ci-dessous :


Ce pictogramme indique que l'utilisation est mentionnée dans plusieurs références avec indication d'un emploi commun


Ce pictogramme indique que l'utilisation est mentionnée dans une seule référence, avec indication d'un emploi fréquent


Ce pictogramme indique que l'utilisation est mentionnée à une seule reprise sans indication de sa fréquence ou pour une utilisation marginale, dans une seule référence

☒ Ce pictogramme associé aux précédents indique une utilisation aujourd'hui arrêtée

1639

Radionucléides / Domaine d'utilisation	^{3}H	^{14}C	^{60}Co	^{90}Sr	^{137}Cs	^{232}Th ▼	^{238}U ▼	^{226}Ra ▼	^{238}Pu	^{239}Pu	^{241}Am
BIOLOGIE											
Biologie végétale		■									
Agronomie			■								
Biochimie	■	■									■
Pharmacologie	■	■						☒ ■			
MEDICAL											
Radiothérapie			■					☒ ■			
Curiethérapie					■			☒ ■			
Diagnostic in vitro	■	■									
Appareillage médical			■		■			☒ ■	■		
SCIENCES DE LA TERRE											
Datations		■				■					
Prospection minière			■		■						■
Génie civil					■						
Hydrologie sout. et surface		■									
RECHERCHE											
Laboratoire		■		■	■	■	■	■			

1640 **NB** : ▼ Ce sigle signifie que le ou les radionucléide(s) concerné(s) appartiennent à une chaîne de filiation.
1641 Les radionucléides fils sont alors à considérer également. Les différentes chaînes sont détaillées en annexe 1.

1642

CARACTERISTIQUES	^{3}H	^{14}C	^{60}Co	^{90}Sr	^{137}Cs	^{232}Th	^{238}U	^{226}Ra	^{238}Pu	^{239}Pu	^{241}Am
période (ans)	12,3	5730	5,27	28,15	30	$1,4.10^{10}$	$4,47.10^{9}$	$1,6.10^{3}$	87,7	$2,41.10^{4}$	432
type d'émission	β	β	$\beta-\gamma$	β	$\beta-\gamma$	$\alpha-\gamma$	$\alpha-\gamma$	$\alpha-\gamma$	$\alpha-\gamma$	$\alpha-\gamma$	$\alpha-\gamma$

Radionucléides / Domaine d'utilisation	^{3}H	^{14}C	^{60}Co	^{90}Sr	^{137}Cs	^{232}Th ▼	^{238}U ▼	^{226}Ra ▼	^{238}Pu	^{239}Pu	^{241}Am
INDUSTRIE											
Radiochimie											
Gammagraphie											
Jauges de mesures											
Polymères											
Radiostérilisations											
Préservation des biens culturels											
Détecteurs de fumées											
Paratonnerre								☒			☒
Appareillage de navigation (aéronaut.)								☒			
Fonderie/métallurgie en aéronautique											
Métallurgie de l'uranium											
Fabrication de peintures luminescentes								☒			
Horlogerie								☒			
INDUSTRIE MINIERE											
Extraction du radium						☒	☒	☒			
Traitement de minerais (monazite)						☒	☒	☒			
AUTRES											
Décharge	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒		☒	
Travaux publics (remblais)						☒	☒	☒			

NB : ▼ Ce sigle signifie que le ou les radionucléide(s) concerné(s) appartiennent à une chaîne de filiation. Les radionucléides fils sont alors à considérer également. Les différentes chaînes sont détaillées en annexe 1.

Annexe 5 QUESTIONNAIRE POUR L'ENQUETE DOCUMENTAIRE ET LA VISITE DE SITE

QUESTIONNAIRE

AUTEUR : ..... **ORGANISME** : .....

DATE(S) de(s) VISITE(S) : .....

1. LOCALISATION / IDENTIFICATION

LIEU DIT.....

COMMUNE : ..... DEPARTEMENT : .....

CODE POSTAL : .....

DESIGNATION USUELLE DU SITE : .....

ADRESSE : .....

.....

CARTE TOPOGRAPHIQUE / LOCALISATION :

(Nom, Echelle utilisée pour le report des limites approximatives du site) : .....

.....

Coordonnées LAMBERT : X : ..... Y : .....

SUPERFICIE APPROXIMATIVE : .... hectares, ... m^2

PROPRIETAIRE IDENTIFIE : .....

EXPLOITANT IDENTIFIE : .....

TYPE DE SITE :

SITE NON EN ACTIVITE ☐

Préciser l'utilisation actuelle :

Rechercher les activités ou utilisations antérieures

SITE EN ACTIVITE ☐ Préciser l'activité actuelle

Rechercher les activités ou utilisations antérieures

2. DESCRIPTION DU SITE

- SCHEMA D'IMPLANTATION SUR LE SITE - PHOTOGRAPHIE(S) :

- BATIMENT(S) : NOMBRE : .....

Dénomination	Type	Etat	Dimension	Utilisation	Accès

- SUPERSTRUCTURE(S) / OUVRAGE(S) : NOMBRE : .....

Nom	Type	Etat	Dimension	Utilisation	Accès

- STOCKAGE(S) : NOMBRE : .....

Nom / Localisation				
Type				
Conditionnement				
Confinement				
Volume (m^3)				
Etat				
Substances/Produits identifiés				
Risques particuliers				

FACTEUR AGGRAVANT [**] : OUI ☐ NON ☐

Si oui, Décrire : .....

- DEPOT(S) / DECHARGE(S) : NOMBRE : .....

Dénomination				
Conditionnement				
Confinement / Etanchéité				
Volume (m3)				
Accès				
Déchets identifiés				
Risques particuliers				
Stabilité du dépôt *				
Facteur aggravant **				

* N : Non P : Potentiel

E : Evident, avec trois niveaux possibles : F(aible) M(oyen) E(levé)

** Ex. : Topographie, rivière en pied de talus, …

- REJETS LIQUIDES

Nature des rejets liquides	Oui / Non	Volume / an
Services généraux (sanitaires, chaufferie)		
Eaux de procédés de fabrication		
Eaux de circuits de refroidissement / chauffage		
Rejets occasionnels (vidanges, lavages)		

Type de réseaux d'évacuation	Oui / Non	Contrôle qualitatif *	Contrôle quantitatif *	Contrôle continu *	Contrôle discontinu *

* Préciser le type de contrôle

Présenter éventuellement un schéma de fonctionnement

- REJETS ATMOSPHERIQUES

Origine des rejets	Volume / an	Contrôle qualitatif	Contrôle quantitatif	Contrôle continu / discontinu

- AUTRES CARACTERISTIQUES DU SITE :
  - Remblais d'origines diverses sur le site ☐
  - Excavations, sapes de guerre ☐
  - Orifices (puits) ☐
  - Galeries enterrées ☐
  - Glissements de terrain ☐
  - Autres : ..... ☐

Risque(s) potentiel(s) associé(s) .....
……
……

3. MILIEU(X) SUSCEPTIBLE(S) D'ÊTRE POLLUÉ(S) :

- AIR
  - Existence de source(s) d'émissions gazeuses ou de poussières (fûts fuyards, lagunes, décharges, …) : oui ☐ non ☐
    Préciser lesquelles :
  - Existence de produit(s) volatil(s) / pulvérulent(s) : oui ☐ non ☐

- EAUX SUPERFICIELLES
  - Distance du site ou de la source au cours d'eau le plus proche : m/km
  - Estimation des débits du cours d'eau : ..... (préciser l'unité)
  - Utilisation sensible du cours d'eau le plus proche : oui ☐ non ☐

  Nature :
  - Existence de rejets directs en provenance du site : oui ☐ non ☐
  - Signes de ruissellement superficiel : oui ☐ non ☐
  - Situation en zone d'inondation potentielle : oui ☐ non ☐

- EAUX SOUTERRAINES
  - Existence d'une nappe d'eau souterraine sous le site : oui ☐ non ☐
  - Nature de l'aquifère : .....
  - Estimation de la profondeur de la nappe : ..... m
  - Utilisation sensible des eaux souterraines : oui ☐ non ☐

  Nature :
  - Distance du captage le plus proche : ..... m
  - Existence potentielle de circulations préférentielles vers la nappe (failles, fractures, puits anciens…) : oui ☐ non ☐
  - Existence d'un recouvrement constitué de formations géologiques à faible perméabilité : oui ☐ non ☐
- SOL
  - Projet de requalification du site à court terme : oui ☐ non ☐
- POLLUTIONS / ACCIDENTS DEJA CONSTATES : oui ☐ non ☐

Date	Type	Equipement concerné	Origine principale	Manifestations principales

- Pollution de l'atmosphère : oui ☐ non ☐ - Caractéristiques : .....
- Pollution des eaux de surface : oui ☐ non ☐ - Caractéristiques : .....
- Pollution des eaux souterraines : oui ☐ non ☐ - Caractéristiques : .....
- Pollution des sols : oui ☐ non ☐ - Caractéristiques : .....
- Dommages au patrimoine : oui ☐ non ☐ - Caractéristiques : .....
- Atteinte à la faune : oui ☐ non ☐ - Caractéristiques : .....
- Atteinte à la flore : oui ☐ non ☐ - Caractéristiques : .....

Mesures d'urgence prises : .....
.....
.....

- Plaintes à répétition : oui ☐ non ☐

  Milieu(x) concerné(s) : 1) .....
  2) .....
  3) .....

4. OCCUPATION DU SITE

- Conditions d'accès au site
  - o Site clôturé et surveillé ☐
  - o Site non clôturé ou clôture en mauvais état, mais surveillé ☐
  - o Site clôturé mais non surveillé ☐
  - o Site non clôturé ou clôture en mauvais état et non surveillé ☐
- Occupation actuelle du site (plusieurs réponses possibles)
  - o Agricole / Forestier ☐
  - o Industriel ☐
  - o Friche industrielle ☐
  - o Commercial ☐
  - o Usages sensibles (habitations, écoles, hôpitaux,…) ☐
  - o Loisirs ☐
  - o Autres – Préciser la nature : ☐
- Populations présentes sur le site
  - o Aucune présence ☐
  - o Présence occasionnelle
    (préciser la durée et le nombre de personnes concernées) ☐
  - o Présence régulière
    (préciser le nombre de personnes concernées) ☐
- Typologie des populations présentes sur le site
  - o Adultes informés ☐
  - o Adultes non informés ☐
  - o Personnes sensibles (enfants, personnes âgées,…) ☐

5. ENVIRONNEMENT DU SITE

- o Agricole / Forestier ☐
- o Zone naturelle ☐
- o Industriel ☐
- o Commercial ☐
- o Etablissement sensibles ☐ (crèches, établissements scolaires)
- o Habitat : * Urbain ☐
  * Péri urbain ☐
  * Dispersé ☐

6. DOCUMENTS CONCERNANT LE SITE

1) .....

2) .....

3) .....

4) .....

5) .....

6) .....

7) .....

8) .....

9) .....

10) .....

7. PERSONNES RENCONTREES OU A RENCONTRER

	Nom	Organisme	Téléphone
1)			
2)			
3)			
4)			
5)			

8. PREMIERES ACTIONS DE PROTECTION

☐ Restriction d'accès ou de circulation sur le site

☐ Balisage des zones présentant une radioactivité élevée

☐ Déplacement des personnes exposées

☐ Limitation de l'usage de l'eau

☐ Mesures de restriction de l'usage des sols

1860 **9. MESURES DE MISE EN SECURITE A PRENDRE**

ACTION	Nb	DEGRE D'URGENCE
Enlèvement de fûts, bidons		
Excavations de terres		
Stabilisation de produits ou de sources {bassins, dépôts...)		
Mise en œuvre d'un confinement		
Restrictions d'accès au site (clôture...)		
Evacuation du site		
Création de réseau de surveillance des eaux souterraines		
Contrôle d'une source d'alimentation en eau potable		
Démolition de superstructures (bâtiments, réseaux aériens...)		
Comblement de vides		

1861 **En cas de nécessité, prévenir les autorités préfectorales et municipales.**

Annexe 6 MOYENS DE DETECTION DE LA RADIOACTIVITE

MESURE DE L'EXPOSITION EXTERNE γ, X, β

TYPE DE DETECTEUR	RAYONNEMENTS DETECTES	GRANDEURS PHYSIQUE MESUREE	GAMME DE DETECTION EN ENERGIE	PLAGE DE MESURE [4]
Chambre d'ionisation	γ, X, β	Débit de dose absorbée sous 7 $mg.cm^{-2}$ et 300 $mg.cm^{-2}$ et dose absorbée	10 keV à 10 MeV	2 $\mu Gy.h^{-1}$ à 1 $Gy.h^{-1}$ et 2 µGy à 1 Gy (*)
Geiger Muller compensé en énergie	γ, X	Débit de dose équivalente	30 keV à 2 MeV	1 $\mu Sv.h^{-1}$ à 3 $Sv.h^{-1}$. 0,1 $\mu Sv.h^{-1}$ à 0,1 $Sv.h^{-1}$
Geiger Muller compensé en énergie	γ, X	Débit de dose absorbée	45 keV à 1,3 MeV	10 $nGy.h^{-1}$ à 10 $mGy.h^{-1}$
Scintillateur plastique	γ, X	Débit de dose absorbée	20 keV à 7 MeV	10 $nGy.h^{-1}$ à 100 $\mu Gy.h^{-1}$
Compteur proportionnel	γ, X	Débit d'équivalent de dose	30 keV à 3 MeV	10 $nSv.h^{-1}$ à 1 $Sv.h^{-1}$

[4] Pour les rayonnements γ, β et X, 1 Gy équivaut à 1 Sv

1870 # APPAREILS DE PROSPECTION

TYPE DE DETECTEUR	RAYONNEMENTS DETECTES	MESURE	GAMME DE DETECTION EN ENERGIE	PLAGE DE MESURE EN COUPS/S
Scintillateur NaI (Tl)	γ, X	Taux de comptage	> 30 keV	0 à $1,5.10^4$ $c.s^{-1}$
Scintillateur plastique	γ, X	Taux de comptage	> 50 keV	0 à $1,5.10^4$ $c.s^{-1}$

1871 # APPAREILS DE MESURE DE LA CONTAMINATION SURFACIQUE

TYPE DE DETECTEUR	RAYONNEMENTS DETECTES	MESURE	SEUIL DE DETECTION EN ENERGIE	RENDEMENT DE DETECTION	PLAGE DE MESURE
Détecteur à sondes multiples	γ, X, β, α	Taux de comptage	5 keV à 6 MeV selon la sonde utilisée	5 à 30 % selon la sonde utilisée	0 à 10^4 $c.s^{-1}$
Compteur proportionnel équipé d'une sonde	α, β, γ	Taux de comptage	10 keV à 6 MeV selon la sonde utilisée	5 à 30 % selon le rayonnement mesuré	0 à 3.10^3 $c.s^{-1}$

1872 # CARACTERISTIQUES DES SONDES D'UN CONTAMINAMETRE (CAS DU
1873 # MIP)

SONDE	APPELLATION	TYPE DE COMPTEUR	RAYONNEMENTS DETECTES	SENSIBILITE AUX RAYONNEMENTS	MOUVEMENT PROPRE
alpha	SA	SZn	α	-	1 à 2 imp/min
bêta faible énergie	SBM	Compteur Geiger-Müller	ß Eßmax > 50 keV	Tous les autres	1à 2 imp/s
bêta	SB	Scintillateur plastique	ß Eßmax > 200 keV	X et γ	1 à 2 imp/s
X	SX	NaI mince (2mm)	X et γ	β (électrons)	10 à 20 imp/s
gamma	SG	NaI épais (2 cm)	Eγ > 200keV	-	20 à 40 imp/s

1874

APPAREILS DE MESURE DU RADON 222

CARACTERISTIQUE DU PRELEVEMENT	METHODE DE DETECTION	EXEMPLE	NORME AFNOR	SEUIL DE DETECTION BQ/M^3	GAMME DE MESURE kBq/m^3
Ponctuel	Scintillation (ZnS, Ag)	Fiole de Lucas ou fiole scintillante	NF M 60-768	500	1 à 10 000 voire plus en jouant sur la dilution
Continu	Courant d'ionisation	Chambre d'ionisation à circulation Compteur proportionnel Chambre d'ionisation à diffusion	NF M 60-766	10	0,01 à 1 000
	Spectrométrie alpha	Détecteur de silicium en regard d'un volume déterminé	NF M 60-766	500	1 à 100
Intégré	Détecteur solide de traces nucléaires	« Dosimètre passif »	NF M 60-767	20	0,02 à 20
	Décharge d'une surface polarisée	Chambre d'ionisation à électrets	NF M 60-767	50	0,05 à 20

1878

DESCENDANTS A VIE COURTE DU RADON					
CARACTERISTIQUE DU PRELEVEMENT	**METHODE DE DETECTION**	**EXEMPLE**	**NORME AFNOR**	**SEUIL DE DETECTION NJ/M^3**	**GAMME DE MESURE**
Ponctuel	Scintillation (ZnS, Ag)	Prélèvement sur filtre puis comptage avec un scintillateur : méthodes de Thomas, Rolle	NF M 60-765	100	100 nJ/m^3 au mJ/m^3
	Comptage alpha	Prélèvement sur filtre puis comptage avec un détecteur de silicium : méthodes de Thomas, Rolle	NF M 60-765	100	100 nJ/m^3 au mJ/m^3
Intégré	Détecteur solide de traces nucléaires	Prélèvement sur filtre "Dosimètre actif de site" : spectrométrie alpha mécanique	NF M 60-764	10	10 nJ/m^3 à 0,1 mJ/m^3

Annexe 7 LE PRELEVEMENT ET LA MESURE DES ECHANTILLONS

Les prélèvements peuvent être engagés pour la caractérisation radiologique du site et/ou pour une évaluation des doses. Dans ce cas, les échantillons à prélever doivent être représentatifs des voies d'exposition identifiées. Les prélèvements doivent être réalisés de manière optimale selon l'échelle d'observation souhaitée à la fois spatiale et temporelle.

Il faut s'assurer que l'échantillonnage et l'analyse des résultats peut être accomplie dans les délais impartis en définissant correctement le nombre d'échantillons à prélever et à préparer, et le nombre d'analyses à effectuer.

Pour obtenir des résultats de mesure, plusieurs étapes sont nécessaires :
- définition des analyses à effectuer et identification des méthodes de prélèvement associées,
- constitution des échantillons,
- mesure des échantillons,
- prise en compte des équilibres dans la métrologie des radionucléides nécessaire pour faciliter la mesure et donc l'analyse,
- mesures du radon traité séparément car elles demandent des équipements et des méthodes de prélèvement spécifique.

Les protocoles de prélèvement et les techniques de mesure ne sont pas détaillés ici. Il faut se référer aux normes dont la liste principale se trouve à la fin de cette annexe.

1. LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE ET LE PRELEVEMENT

Aucune démarche systématique ne peut être proposée, chaque site étudié nécessitant une adaptation. Un échantillonnage correspond à une sélection de points de prélèvement sur la base de l'étude historique réalisée, de l'inspection visuelle du site, des résultats déjà obtenus par ailleurs et des objectifs recherchés.

L'échantillonnage concerne essentiellement :
▪ Pour le milieu terrestre :
- les gaz et poussières atmosphériques,
- les sols cultivés : maraîchers, de cultures céréalières, de vigne…,
- les sols non cultivés : prairies, forêts, garrigues…,
- les végétaux cultivés : fruits, légumes, céréales…,
- les végétaux non cultivés : mousses, lichens, herbage spontané, champignons…,
- les animaux : animaux d'élevage, gibiers…,
- les produits alimentaires transformés : beurrer, fromage, cidre, vin…,

- les produits alimentaires non transformés : lait, miel…

▪ Pour le milieu aquatique continental :

- les eaux selon leur origine (de pluie, d'irrigation, de surface ou de nappes), et leur utilisation,
- les boues de stations d'épuration,
- les sédiments,
- les végétaux : plantes semi-aquatiques, plantes immergées, mousses,
- les animaux : mollusques, poissons…

▪ Pour le milieu marin :

- les eaux,
- les sédiments,
- les algues,
- les végétaux supérieurs, en particulier les posidonies ou les zostères…
- les animaux : crustacés, mollusques, poissons…

Le chapitre se terminera par une remarque sur la constitution des échantillons.

1.1 CAS DES SOLS EN PLACE, DES VEGETAUX ET DES ANIMAUX

C'est en priorité à partir de la cartographie de surface du site et de ses alentours que s'effectue la localisation des prélèvements. Des approches de type « nombre réduit de points sur une grille systématique » ou « échantillons composites » (mélange d'échantillons pour réduire le nombre d'analyses) peuvent permettre d'appréhender certains types de situations.

Un grand nombre de normes décrivent dans le détail les modes opératoires à respecter. La norme chapeau des prélèvements dans le sol est la norme NF ISO 18589-1 qui indique les références d'autres normes pour traiter au mieux chaque cas particulier.

Les sols cultivés retournés par les labours successifs présentent théoriquement des caractéristiques physico-chimiques et radioactives homogènes dans l'épaisseur labourée. Il ne faut pas prélever l'horizon sous-jacent non travaillé.

Pour **les sols non cultivés**, les prélèvements sont faits dans des zones horizontales non soumises au ruissellement et excluant toute possibilité de stagnation de l'eau de pluie de manière à être représentatifs de la zone échantillonnée. Cette façon de procéder réduit la possibilité de trouver toute pointe de contamination liée à des phénomènes de concentration.

Pour estimer un historique de la contamination du site, trois tranches sont en général étudiées (0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm). Le prélèvement s'effectue à l'aide d'un tube carottier en acier inoxydable de faible diamètre, gradué de 5 en 5 cm et muni d'un piston permettant l'évacuation de la carotte formée.

L'échantillon de **végétaux terrestres** prélevé dans un champ doit être représentatif de la culture et correspondre à la fraction de sol prélevée. Il faut préciser s'il s'agit de produits de plein champ ou de produits de serres.

Les mousses sont prélevées simplement à la main ; les saxicoles sont prélevées sur des murs et parapets et les terricoles sur le sol, le bas des arbres ou les vieilles souches. Dans le cas général l'échantillon de mousses prélevé est le résultat d'un mélange d'espèces.

Tous les autres végétaux, herbe, thym, légumes ou fruits, sont prélevés à la main ou à l'aide de ciseaux ou de sécateurs. La norme NF M60-780-2 décrit le choix des bioindicateurs et les techniques d'échantillonnage. La conservation de ces échantillons est précisée dans la norme NF M60-780-3.

Les **végétaux comestibles** sont prélevés à maturité, donc propres à la consommation. Dans une prairie permanente, selon l'étude, il peut être demandé de prélever le mat qui correspond à la couche de transition entre la partie aérienne et le sol.

Dans tous les cas, les débris de substrat ou de sols sont éliminés. La quantité de végétal à prélever est déterminée en fonction du rapport poids sec / poids frais de l'échantillon et de la quantité nécessaire pour faire la mesure (voir **tableaux 6.1 et 6.2**). Les végétaux terrestres sont transportés soit dans des sacs en plastique, soit dans des sacs en nylon ajourés. Pour plus de détail, il faut se reporter à la norme NF V03-009-1 qui est un guide de prélèvement, de transport et de conservation des denrées alimentaires.

La plupart des **produits agricoles consommés par l'homme après transformation** sont directement recueillis chez leur producteur, de façon à connaître l'impact dosimétrique sur une personne consommant sa propre production. Il peut être important d'effectuer des mesures similaires sur des produits prélevés sur les lieux de vente, de façon à tenir compte de l'apport de produits d'autres régions dans la ration alimentaire. Toutes les informations sur l'origine des produits et leur distribution sont soigneusement notées.

Les échantillons de **gibier** sont achetés à des chasseurs locaux ; le transport au laboratoire se fait en sacs étanches dans des glacières. Les informations sur leur origine sont soigneusement notées.

Tableau 6.1 : Exemples de rapports moyens existant entre les poids frais (PF), les poids secs (PS) et les poids de cendres (PC).

Echantillons	PF/PS	PF/PC
Sédiments (221)	2,0 ± 0,2	
Mousses aquatiques (68)	5,0 ± 0,3	23,3 ± 3,2
Phanérogames immergées (192)	12,2 ± 0,5	55,5 ± 3,0
Phanérogames semi-aquatiques Parties aériennes (71)	5,6 ± 0,5	50,3 ± 3,7
Phanérogames semi-aquatiques Parties souterraines (70)	6,0 ± 0,4	50,6 ± 5,0
Phanérogames semi-aquatiques entières (24)	6,7 ± 3,4	43,3 ± 23,8
Mousses terrestres(230)	3,1 ± 0,3	20,3 ± 3,0
Salade (89)	19,9 ± 1,9	89,8 ± 9,8
Poissons (452)	3,7 ± 0,1	29,2 ± 1,4
Pommes (40)	6,9 ± 0,4	205 ± 29
Céréales (148)	1,5 ± 0,1	60,2 ± 5,2

1.2 CAS DES AEROSOLS

L'implantation de l'appareillage doit être choisie de façon à limiter tout risque de contamination des prélèvements par des remises en suspension de poussières de sol qui peuvent se produire à proximité de champs labourés. Les modes opératoires de prélèvement sont explicités dans la norme NF M60-760.

Le volume d'air à filtrer dépend du nombre de mesures à effectuer. L'appareillage prélève l'air en continu, ou de façon séquentielle. Les filtres doivent être changés régulièrement, afin de garantir une efficacité maximale de filtration. Lors de la mise en place et du retrait d'un filtre, il est nécessaire de noter son numéro, la date ainsi que le volume et l'heure indiqués sur l'appareil.

1.3 CAS DES EAUX SUPERFICIELLES

L'échantillon d'eau peut être représentatif de la qualité d'un cours d'eau soit à un moment donné, soit en moyenne pendant une période plus ou moins longue d'observation. Il convient de rappeler que, compte tenu des changements des conditions météorologiques et du rythme des activités humaines (notamment en termes de volume et de qualité des rejets), la qualité instantanée d'un cours d'eau peut être très variable. On ne peut donc, en général, se contenter d'un ou deux prélèvements pour juger de cette qualité.

Il est conseillé de procéder à des prélèvements d'eau dans les règles fixées par les Agences de l'Eau, soit :

- en aval du rejet du site,
- au droit des compartiments de l'environnement susceptibles d'être contaminés.

Les échantillons sont recueillis dans des flacons en plastique de 1 l, ou plus. Le récipient est rempli jusqu'à débordement et fermé de façon hermétique afin d'éviter tout contact avec l'air. Le volume de l'échantillon à

prélever dépend du nombre et des types d'analyses à effectuer (voir **tableau 6.1**). A noter que les quantités indiquées dans le tableau sont nécessaires pour mesurer la radioactivité naturelle. En cas de forte contamination, les quantités à prélever peuvent être réduites.

Pour les retenues d'eau et lacs, les prélèvements doivent être effectués aux points d'arrivée et de vidange des retenues, selon la norme ISO 5667-1, car l'eau peut être stratifiée avec des différences significatives selon la profondeur. Pour les lacs naturels la qualité de l'eau peut présenter des hétérogénéités importantes aussi bien dans le sens vertical (stratification influences de la surface, sédiments et matières en suspension), que dans le sens horizontal (rives dentelées, présence de plusieurs bassins…). La qualité varie également de manière importante suivant l'heure de la journée. Il faut adapter la stratégie d'échantillonnage en fonction de l'étude à réaliser.

Les sédiments sont en général de bons intégrateurs de la contamination présente. Ils constituent un réservoir de contamination du milieu aquatique. Les prélèvements sont réalisés de plusieurs façons, selon la nature du substrat et l'objectif recherché. Ils se font manuellement à l'aide d'une pelle sur une surface délimitée surtout pour les sédiments marins, par dragage pour les sédiments déposés en bordure des berges, par bennes conçues pour pénétrer le substrat sous l'effet de leur propre masse et de leur propre effet levier. Les carottiers sont utilisés lorsque l'information recherchée concerne le profil vertical des sédiments. Les prélèvements sont déposés dans des sacs en polyéthylène fermés puis déposés dans des pots en plastique étiquetés.

L'hétérogénéité des **boues de décantation** issues du traitement des eaux implique de prélever un grand nombre d'échantillons à divers profondeurs pour obtenir un échantillon composites représentatifs.

Tableau 6.1 : Exemples de quantités nécessaires de substance pour certains types d'analyses (en grammes frais ou en litres pour l'eau)

Echantillons	Spectro-métrie γ	Spectro-métrie α	^{90}Sr	α + ß totaux	^{3}H	Granulo-métrie	Analyse chimique	Total
Sédiment	1 200	500	200	120	1 000	400	1 000	≈ 4 500
Boues	1 200	500	200	120	1 000	400	1 000	≈ 4 500
Mousses aquatiques	500	1 200	1 000	120	500	_	150	≈ 3 500
Phanérogames immergées	1 200	3 000	2 400	300	1 200	_	350	≈ 8 500
Mousses terrestres	500	1 200	1 000	120	500	_	150	≈ 3 500
Salade	1 800	4 500	3 600	450	1 800	_	550	≈ 12 500
Poissons entiers (1)	600	1 500	1 300	150	350	_	200	≈ 4 100
Pommes	4 200	10 000	8 500	1 300	700	_	1 300	≈ 26 000
Céréales	1 300	3 100	2 500	350	150	_	400	≈ 8 000
Eau	200	500	100	1	1	_	1	≈ 800

(1) Si les analyses portent aussi sur les muscles, les quantités de poissons à prélever doivent être multipliées par 3.

La quantité de **végétaux aquatiques** à prélever est déterminée en fonction de leur rapport poids frais/poids cendres et des quantités nécessaires pour faire les mesures (voir tableau 6.1 et 6.2). Chaque échantillon est soigneusement lavé dans l'eau du fleuve ou l'eau de mer, selon sa provenance, car les végétaux renferment souvent, dans leurs réseaux de racines et de tiges du sédiment, des débris divers et des organismes vivants. Les végétaux sont disposés par espèces dans des bacs aérés afin d'éviter tout pourrissement, et traité dès leur arrivée au laboratoire.

Après avoir localisé les différentes espèces d'algues présentes, un prélèvement de 5 kg peut être effectué en 3 à 5 points le long d'une ligne perpendiculaire au rivage traversant une population d'une seule espèce comme les fucus par exemple. Ceci permet d'obtenir un échantillon moyen représentatif de la population tenant compte des variations de concentration des divers radioéléments en fonction de l'étagement sur l'estran qui influe sur le temps d'immersion annuel moyen des algues. L'eau étant le vecteur de contamination, les algues d'étages bas, plus longtemps immergées sur l'année, présentent des concentrations en radioéléments plus importantes que celles des étages plus élevés.

Les pêches sont réalisées en eaux douces ou en bordure de mer dans un rayon de 5 km autour du site. Les poissons marins sont pour la plupart des espèces migratrices. Il est donc difficile d'établir une relation entre la concentration en radioéléments du poisson et les rejets du site. L'institut français pour l'exploitation de la mer (IFREMER), la Marine nationale, des laboratoires maritimes et des pêcheurs locaux peuvent apporter leur soutien logistique pour la réalisation des prélèvements qui peuvent se faire par la pêche au filet ou à la pêche électrique. Les poissons capturés sont triés par espèce, conditionnés en sacs plastiques, étiquetés et mis dans des glacières pour leur transport. La détermination des espèces de poissons est effectuée après capture, lors des mesures de biométrie, par les équipes responsables des pêches.

1.4 CAS DES EAUX SOUTERRAINES

L'eau de nappe est prélevée selon un échantillonnage discret ou continu. Le prélèvement peut se faire directement au robinet d'un forage exploité à l'aide d'une pompe dans le cas d'un piézomètre existant ou à créer. Dans tous les cas, le prélèvement dans un bidon en plastique ne débute qu'après la stabilisation des caractéristiques de l'eau et la vidange du système d'extraction de l'eau.

Le plan de prélèvement devra en particulier préciser :

- la sélection des milieux à contrôler (aquifère superficiel dans sa globalité ou en partie),
- le nombre et la localisation des points de prélèvement.

Les Agences de l'Eau peuvent apporter des informations utiles quand la nappe impliquée fait déjà l'objet d'une surveillance de leur part. Ils peuvent donner des indications sur la variabilité saisonnière de la nappe quant à sa profondeur et ses liens avec les cours d'eau avoisinants.

1.5 LA CONSTITUTION DES ECHANTILLONS

La variabilité naturelle des écosystèmes fait qu'il est souvent mais pas toujours nécessaire de constituer un échantillon « moyen » à partir d'échantillons élémentaires collectés au sein de la zone considérée, ou à différents instants pendant une période déterminée.

La constitution d'un échantillon requiert quatre phases : la collecte proprement dite, le traitement préparatoire de l'échantillon (conservation, séchage ou filtration selon la nature solide ou liquide de l'échantillon), la préparation de l'échantillon, (broyage, calcination ou évaporation selon la nature de l'échantillon) et enfin son conditionnement pour la mesure.

Les échantillons récoltés sont référencés (numéro, date et lieu de prélèvement, nature, fraction) avant leur envoi au laboratoire chargé de la mesure.

Il faut souligner que la bonne exécution des différentes phases exige du temps et un personnel qualifié.

2. LE TRAITEMENT DES ECHANTILLON ET LA MESURE

La mesure ne se réduit pas toujours à la seule mesure de la radioactivité. Il est parfois nécessaire de connaître les caractéristiques du milieu au moment du prélèvement ou les particularités de l'échantillon, à l'aide d'analyses :

- « physiques et chimiques classiques adaptées aux milieux étudiés ; par exemple pour les eaux : le pH, la conductivité, l'oxygène dissous, les cations et anions majeurs; et pour les végétaux la teneur en eau ;
- minéralogiques pour les sols, les sédiments et les matières en suspension ;
- de la granulométrie et de la capacité d'échange cationique pour les sols, les sédiments, les matières en suspension et les aérosols ;
- élémentaires telles que celle de la concentration de certains éléments stables comme le calcium, le potassium, ... »

Les analyses servant à qualifier et quantifier la radioactivité des échantillons sont :

- l'analyse globale : mesure de débit de dose ;
- les analyses quantitatives : identification des émetteurs gamma et mesure de leurs activités par spectrométrie, séparation radiochimique des nucléides émetteurs α (américium, isotopes de l'uranium et du thorium), ou β (en particulier le tritium libre, le tritium lié à la matière organique, le ^{90}Sr, le ^{14}C), mesures de l'uranium et du radium respectivement par photoluminescence et émanométrie... ;
- les analyses semi-quantitatives : mesures du rayonnement α total ou β total ; ces mesures ne permettent pas l'identification des différents radionucléides émetteurs α ou β, naturels ou artificiels ; dans l'environnement, la mesure α totale reflète les concentrations des familles de l'^{238}U et du ^{232}Th, et la mesure β totale celle du ^{40}K.

4. MESURE DU RADON

La mesure du radon repose sur différentes méthodes de prélèvement. Les mesures peuvent être classées en trois types selon les caractéristiques du prélèvement d'air :

- **les mesures ponctuelles** correspondent à des prélèvements effectués sur une courte durée, de l'ordre de quelques minutes ou moins. Elles ne sont représentatives que de l'instant du prélèvement.
- **les mesures intégrées** consistent en une intégration temporelle de grandeurs physiques, liées aux décroissances du radon ou de ses descendants [nombre de traces, nombre de charges, nombre d'atomes]. Ce type de mesure permet d'accéder à une concentration en radon moyenne sur la période considérée.
- **les mesures en continu** ont un échantillonnage et une analyse simultanés, ou en léger différé. Elles permettent de faire un suivi phénoménologique temporel et de vérifier rapidement l'efficacité des techniques de réduction lors d'études de bâtiments.

La figure n°6.2 permet de bien visualiser les différences entre les méthodes de mesures.

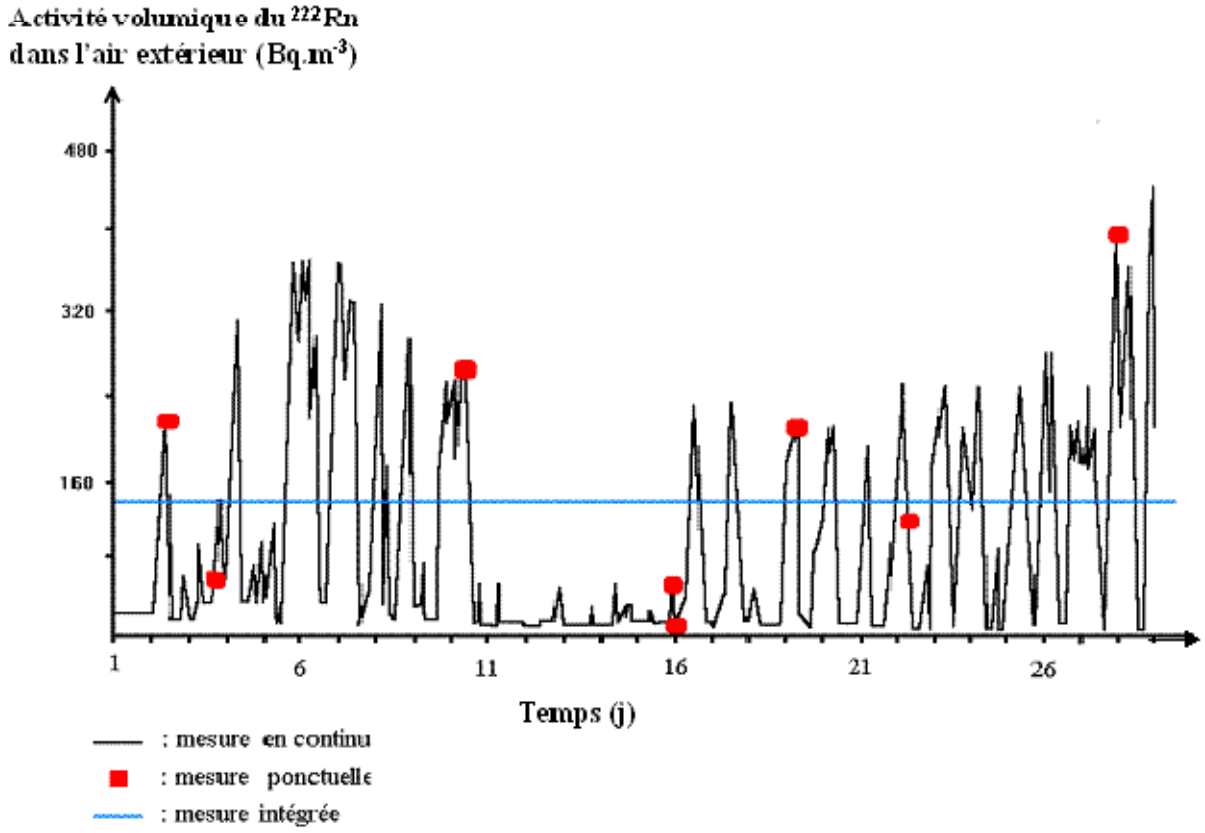


FIGURE N°6.2 : COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE MESURE

Des investigations complémentaires peuvent être mises en œuvre dans les différents compartiments du bâtiment où le radon est susceptible d'être présent afin de préciser les modalités de pénétration et d'accumulation du gaz.

- dans le sol ;
- à l'interface sol atmosphère ;
- dans l'air des différents compartiments du bâtiment [sous-sol, cellule habitée] ;
- dans les fissures ;
- à l'extérieur du bâtiment éventuellement ;
- dans l'eau.

Différentes techniques permettent de prélever le radon, à la source, avant sa sortie et sa dilution par l'air ambiant.

Estimation de la source

Mesure du radon dans l'air du sol

Pour mesurer l'activité volumique du radon dans l'air du sol, la technique de mesure utilisée consiste à prélever un échantillon d'air du sol en un point donné du site étudié. Le prélèvement de gaz dans le sol se fait à l'aide d'une « canne de prélèvement ». Afin de perturber le moins possible le sol, la canne a un diamètre extérieur de 1 cm contre 1 mm pour le diamètre intérieur et elle est enfoncée à au moins 50 cm de profondeur dans le sol. Les prélèvements de gaz sont réalisés par l'intermédiaire de cette canne et introduits dans des fioles scintillantes [dispositif ponctuel] de 125 cm^3 préalablement mises sous vide. Cette technique de mesure permet de déterminer l'activité volumique du radon, dans l'air présent dans le sol, à 50 cm de profondeur par un prélèvement instantané de gaz.

Mesure du flux surfacique d'exhalation de radon

Le radon 222, émis par le radium 226 présent dans le sol ou dans les matériaux de construction, est mesuré en termes de flux surfacique d'exhalation, exprimé en Becquerels par mètre carré et par seconde.

La méthode de mesure utilisée est la méthode dite « d'accumulation », décrite dans la norme AFNOR NF M60-768. Elle consiste à déterminer après un temps d'accumulation donné l'activité volumique du radon dans un conteneur dont la face ouverte est appliquée sur la surface étudiée [sol, roche, matériau de construction en place, mur, etc.]. Ce conteneur possède sur sa face fermée un orifice obturé par un bouchon caoutchouc au travers duquel un prélèvement d'air est effectué à l'aide de fioles scintillantes. Connaissant l'activité volumique dans le conteneur, la durée d'accumulation, la surface et le volume d'accumulation, le flux d'exhalation peut être estimé.

Ces mesures sont complétées par des mesures de débit de photons gamma au contact du sol, déterminé au moyen d'un Scintillomètre Portatif de Prospection [SPP2] et par des prélèvements de sol pour déterminer l'humidité.

A titre indicatif, le flux surfacique d'exhalation moyen à la surface de la terre est 0,02 $Bq.m^{-2}.s^{-1}$.

Mesure du radon dans l'eau

La mesure de l'activité volumique du radon dans l'eau peut être réalisée selon deux grandes techniques normalisées [normes NFM 60-761 parties 1 à 3] :

- les mesures directes pour lesquelles l'échantillon d'eau ne subit aucune transformation ni ajout de composés chimiques, la détection est alors réalisée par spectrométrie gamma;
- les mesures indirectes pour lesquelles la détection est réalisée après transfert du radon de la phase aqueuse vers une autre phase pouvant être gazeuse, liquide ou solide.

Pour les mesures indirectes avec un transfert du radon de la phase aqueuse à la phase air, le radon peut être mesuré au moyen de fioles scintillantes [méthode dite "coton"] ou d'une chambre d'ionisation. Dans le premier cas, un volume connu d'eau à analyser est prélevé à l'aide d'une seringue. Un morceau de coton hydrophile est placé, au préalable, dans l'évidement intérieur du bouchon d'une fiole scintillante. Après injection dans la fiole, l'eau prélevée imprègne le coton et le radon dégaze progressivement dans l'air de la fiole. A partir de la mesure de l'activité volumique du radon dans l'air de la fiole et du coefficient de partage du radon ente l'eau et l'air, l'activité volumique du radon dans l'eau peut être estimée.

Mesure du radon dans l'atmosphère du bâtiment et dans l'environnement extérieur

En fonction de l'objectif recherché, l'activité volumique du radon dans l'atmosphère tant intérieure qu'extérieure peut être mesurée soit par des mesures ponctuelles [norme AFNOR NF M60-769] soit par des mesures en continu [norme AFNOR NF M60-767].

Elles peuvent être complétées par des mesures de l'énergie alpha potentielle des descendants à vie courte du radon [norme AFNOR NF M60-765].

2196

Références : listes des normes

REFERENCE	DATE	DESIGNATION	Mots clés	SOUS-TITRE
CEI 60325-3	juin-02	INSTRUMENTATION POUR LA RADIOPROTECTION	instrumentation	Contaminamètres et moniteurs de contamination alpha, bêta et alpha/bêta [énergie des bêta > 60 keV]
CEI 60405	avril-03	INSTRUMENTATION NUCLEAIRE	instrumentation	Prescriptions de construction et classification pour les jauges de mesure des rayonnements ionisants
CEI 60846-2	juin-02	INSTRUMENTATION POUR LA RADIOPROTECTION		Instruments pour la mesure et/ou la surveillance de l'équivalent de dose [ou du débit d'équivalent de dose] ambiant et/ou directionnel pour les rayonnements béta, x et gamma
CEI 61577-1	août-00	INSTRUMENTATION POUR LA RADIOPROTECTION	radon	Instruments de mesure du radon et des descendants du radon Partie 1 : Règles générales
CEI 61577-2	octobre-00	INSTRUMENTATION POUR LA RADIOPROTECTION	radon	Instruments de mesure du radon et des descendants du radon Partie 2 : Exigences spécifiques concernant les instruments de mesure du radon
CEI 61577-3	avril-02	INSTRUMENTATION POUR LA RADIOPROTECTION	radon	Instruments de mesure du radon et des descendants du radon Partie 3 : Exigences spécifiques concernant les instruments de mesure du radon
CEI 61582	janvier-04	INSTRUMENT POUR LA RADIOPROTECTION		Systèmes de mesure in vivo - Classification, exigences générales et procédures d'essai pour les appareils portables, mobiles ou poste fixe
EN 60325	novembre-04	INSTRUMENTATION POUR LA RADIOPROTECTION	instrumentation	Contaminamètres et moniteurs de contamination alpha, bêta et alpha/bêta [énergie des bêta > 60 keV]
EN ISO 10012	septembre-03	SYSTEME DE MANAGEMENT DE LA MESURE	métrologie	Exigences pour les processus et les équipements de mesure
EN ISO 5667-1	mars-07	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 1 : Lignes directrice pour la conception des programmes et des techniques d'échantillonnage
EN ISO 5667-2	Déc 1993	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 2 : Guide général sur les techniques d'échantillonnage
EN ISO 5667-3	Juin 2004	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 3 : Lignes directrices pour la conservation et la manipulation des échantillons
EN ISO 5667-10	Nov 1992	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 10 : Guide pour l'échantillonnage des eaux résiduaires
EN ISO 5667-11	Mars 1993	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 11 : Guide général pour l'échantillonnage des eaux souterraines

REFERENCE	DATE	DESIGNATION	Mots clés	SOUS-TITRE
EN ISO 5667-12	Décembre-95	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 12 : Guide général pour l'échantillonnage des sédiments
EN ISO 5667-13	Octobre 1998	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 13 : Guide pour l'échantillonnage de boues provenant d'installations de traitement de l'eau et des eaux usées
EN ISO 5667-15	Août 1999	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 15 : Guide général pour la préservation et le traitement des échantillons de boues et de sédiments
EN ISO 5667-17	Juillet 2000	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 17 : lignes directrices pour l'échantillonnage des sédiments en suspension
EN ISO 5667-18	Avril 2001	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	échantillonnage	partie 18 : lignes directrices pour l'échantillonnage des eaux souterraines sur des sites contaminés
FD T 90-520	octobre-05	QUALITE DE L'EAU - ECHANTILLONNAGE	eau	Guide technique de prélèvement pour le suivi sanitaire des eaux en application du code de la santé publique
ISO 7503-1	décembre-88	EVALUATION DE LA CONTAMINATION DE SURFACE	alpha	Partie 1 : émetteurs bêta [énergie bêta maximale supérieur à 0,25 MZv] et émetteurs alpha
ISO 11929-1	juillet-00	DETERMINATION DE LA LIMITE DE DETECTION ET DU SEUIL DE DECISION DES MESURAGES DE RAYONNEMENTS IONISANTS		partie 1 : Principes fondamentaux et application aux mesurages par comptage, sans influence du traitement de l'échantillon
ISO 11929-2	juillet-00	DETERMINATION DE LA LIMITE DE DETECTION ET DU SEUIL DE DECISION DES MESURAGES DE RAYONNEMENTS IONISANTS		partie 2 : Principes fondamentaux et application aux mesurages par comptage, sans influence du traitement de l'échantillon
ISO 11929-3	juillet-00	DETERMINATION DE LA LIMITE DE DETECTION ET DU SEUIL DE DECISION DES MESURAGES DE RAYONNEMENTS IONISANTS		partie 3 : Principes fondamentaux et application aux mesurages par comptage, par spectrométrie gamma haute résolution, sans l'influence du traitement d'échantillon
ISO 11929-4	juin-01	DETERMINATION DE LA LIMITE DE DETECTION ET DU SEUIL DE DECISION DES MESURAGES DE RAYONNEMENTS IONISANTS		partie 4 : Principes fondamentaux et leur application aux mesurages réalisés à l'aide d'ictomètres analogiques à échelle linéaire, sans l'influence du traitement d'échantillon
ISO 11929-5	décembre-05	DETERMINATION DE LA LIMITE DE DETECTION ET DU SEUIL DE DECISION DES MESURAGES DE RAYONNEMENTS IONISANTS		Partie 5 : Principes fondamentaux et leurs applications aux mesurages par comptage réalisés sur filtre lors d'une accumulation de radioactivité
ISO 11929-6	décembre-05	DETERMINATION DE LA LIMITE DE DETECTION ET DU SEUIL DE DECISION DES MESURAGES DE RAYONNEMENTS IONISANTS		Partie 6 : Principes fondamentaux et leurs applications aux mesurages en mode transitoire
ISO 11929-7	novembre-05	DETERMINATION DE LA LIMITE DE DETECTION ET DU SEUIL DE DECISION DES MESURAGES DE RAYONNEMENTS IONISANTS		Partie 7 : Principes fondamentaux et leurs applications générales

REFERENCE	DATE	DESIGNATION	Mots clés	SOUS-TITRE
ISO 11929-8	novembre-05	DETERMINATION DE LA LIMITE DE DETECTION ET DU SEUIL DE DECISION DES MESURAGES DE RAYONNEMENTS IONISANTS		Partie 8 : Principes fondamentaux et leur application à la déconvolution des spectres des mesurages de rayonnements ionisants négligeant l'influence de la préparation d'un échantillon
ISO 14850-1	septembre-06	MESURAGE DE L'ACTIVITE DE COLIS DE DECHETS		Partie 1 : Spectrométrie gamma haute résolution en mode intégral et géométrie ouverte
ISO 18589-1	décembre-05	MESURAGE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL		Partie 1 : Lignes directrices générales et définitions
ISO 18589-2	mars-08	MESURAGE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL		Partie 2 : Lignes directrices pour la sélection de la stratégie d'échantillonnage, l'échantillonnage et le prétraitement des échantillons
ISO 18589-3	mars-08	MESURAGE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL	gamma	Partie 3 : mesurage des radionucléides émetteurs gamma
ISO 7503-1	décembre-88	EVALUATION DE LA CONTAMINATION DE SURFACE	bêta	Partie 1 : Emetteurs bêta [énergie bêta maximale supérieure à 0,15 MeV] et émetteurs alpha
M60-312	oct.-99	MESURES DE LA RADIOACTIVITE DANS -AIR	3H	Détermination par scintillation liquide de l'activité volumique du tritium atmosphérique prélevé par la technique de babortage de l'air dans l'eau
M60-701	décembre-88	EVALUATION DE LA CONTAMINATION DE SURFACE	bêta	Partie 1 : Emetteur bêta [énergie bêta maximale supérieure à 0,15 MeV] et émetteur alpha
M60-702	décembre-88	EVALUATION DE LA CONTAMINATION DE SURFACE	3H	Partie 2 : Contamination de surface par le tritium
M60-750	novembre-89	DECONTAMINATION DES SURFACES CONTAMINEES PAR RADIOACTIVITE		Méthode d'essai et de détermination de l'aptitude à la décontamination
M60-759	avril-05	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	iodes	Détermination de l'activité volumique des iodes atmosphériques
M60-760	octobre-01	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	aérosol	Prélèvement d'aérosols en vue de la mesure de la radioactivité dans l'environnement
M60-761-1	Aout 07	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	Radon	Le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'eau : leurs origines et méthodes de mesure
M60-761-2	janvier-09	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	Radon	Le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'eau : mesures par spectrométrie gamma
M60-761-3	mai-08	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	Radon	Le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'eau : mesurages par dégazage

REFERENCE	DATE	DESIGNATION	Mots clés	SOUS-TITRE
M60-763	septembre-04	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	Radon	Le radon 222 et ses descendants à la vie courte dans l'environnement atmosphériques : leurs origines et méthodes de mesure
M60-764	septembre-04	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	Radon	Radon 222 : méthodes de mesure intégrée de l'énergie alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon dans l'environnement atmosphérique
M60-765	septembre-04	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	Radon	Radon 222 : méthodes de mesure ponctuelle de l'environnement alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon dans l'environnement atmosphérique
M60-766	septembre-04	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	Radon	Le radon 222 : Méthodes de mesure intégrée de l'activité volumique moyenne du radon, dans l'environnement atmosphérique, avec un prélèvement passif et une analyse en différé
M60-767	août-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	Radon	Le radon 222 : Méthodes de mesure en continu de l'activité volumique du radon, dans l'environnement atmosphérique
M60-768	octobre-02	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	Radon	Le radon 222 : Méthode d'estimation du flux surfacique d'exhalation par la méthode d'accumulation
M60-769	novembre-00	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	Radon	Le radon 222 : Méthodes de mesure ponctuelle de l'activité volumique du radon dans l'environnement atmosphérique
M60-770	octobre-00	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR		Collecte des dépôts atmosphériques au sol et détermination de l'activité des dépôts atmosphérique au sol
M60-771	septembre-03	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - AIR	Radon	Le radon 222 dans les bâtiments : méthodologies appliquées au dépistage et aux investigations complémentaires
M60-780-0	mars-01	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Partie 0 : Principes généraux
M60-780-1	mars-01	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Partie 1 : guide général pour l'établissement des programmes d'échantillonnage
M60-780-2	mars-01	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Partie 2 : guide général sur les techniques d'échantillonnage
M60-780-3	mai-97	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Partie 3 : guide général pour la conservation et la manipulation des échantillons
M60-780-4	mai-97	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Partie 4 : guide général pour la préparation des échantillons
M60-780-5	octobre-00	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Partie 5 : guide général pour l'échantillonnage d'indicateurs biologiques du milieu terrestre

REFERENCE	DATE	DESIGNATION	Mots clés	SOUS-TITRE
M60-780-6	septembre-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Partie 6 : guide général pour l'échantillonnage d'indicateurs biologiques du milieu agricole
M60-780-7	octobre-98	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Partie 7 : guide général pour l'échantillonnage d'indicateurs biologiques du milieu marin
M60-780-8	mars-01	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - BIOINDICATEURS		Glossaire
M60-790-1	juillet-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL		Partie 1 : Présentation générale et définitions
M60-790-2	juillet-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL		Partie 2 : Guide pour la sélection des zones de prélèvement, l'échantillonnage, de transport et la conservation des échantillons de sol
M60-790-3	juillet-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL		Partie 3 : Méthode pour le prétraitement des échantillons de sol
M60-790-4	juillet-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL		Partie 4 : Méthode pour une mise en solution des échantillons de sol
M60-790-5	juillet-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL	Strontium 90	Partie 5 : méthode de mesure de l'indice de la radioactivité alpha globale en équivalent ^{239}Pu et de l'indice de radioactivité bêta globale en équivalent ^{99}Sr et ^{90}Y à l'équilibre dans des échantillons de sol
M60-790-6	juillet-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL	gamma	Partie 6 : Méthode pour la mesure de l'activité des émetteurs gamma dans des échantillons de sol
M60-790-7	juillet-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL	Strontium 90	Partie 7 : Méthodes de mesure du strontium 90 dans des échantillons de sol
M60-790-8	juillet-99	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - SOL	plutonium	Partie 8 : Méthodes de mesure des isotopes du Plutonium [plutonium 238 et plutonium 239 + 240] dans des échantillons de sol
M60-800	Sept 2004	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	Strontium 90	Mesurage de l'indice de radioactivité béta globale en équivalent strontium 90 et yttrium 90 dans l'eau peu chargée en sel
M60-801	Sept 2004	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	Pu 239	Mesurage de l'indice de radioactivité alpha en équivalent plutonium 239 dans l'eau peu chargée en sel
M60-802-1	juillet-00	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	bêta	Partie 1 : Mesurage de l'activité des émetteurs bêta par scintillation liquide - cas particulier du tritium
M60-802-2	juillet-00	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	bêta	Partie 2 : Mesurage de l'activité des émetteurs bêta par scintillation liquide - cas particulier du carbone 14

M60-802-3	juin-02	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	3H - 14C	Partie 3 : Mesurage de l'activité des émetteurs bêta par scintillation liquide - cas particulier de la présence simultanée du tritium et du carbone 14
REFERENCE	**DATE**	**DESIGNATION**	**Mots clés**	**SOUS-TITRE**
M60-803	juillet-01	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT - EAU	226Ra	Partie 1 : Mesurage de l'activité du radium 226 dans l'eau
M60-804-1	Avril 2004	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	Pu, Am, Cm, Np	Partie 1 : mesurage de l'activité des transuraniens [Pu, Am, Cm, Np] par spectrométrie alpha dans l'eau
M60-804-2	Avril 2004	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT-EAU	Pu, Am, Cm, Np	Partie 2 : mesurage de l'activité des transuraniens [Pu, Am, Cm, Np] par spectrométrie alpha dans l'eau – séparation des radionucléides à mesurer par l'utilisation de résines anioniques, cationiques et par chromatographie d'extraction
M60-804-3	Avril 2004	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	Pu, Am, Cm, Np	Partie 3 : mesurage de l'activité des transuraniens [Pu, Am, Cm, Np] par spectrométrie alpha dans l'eau– séparation des radionucléides à mesurer par l'utilisation de résines anioniques, cationiques et par chromatographie d'extraction [petits volumes]
M60 805-1	février-03	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	uranium	Partie 1 : mesurage de la concentration de l'uranium dans l'eau par fluométrie
M60 805-2	février-03	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	uranium	Partie 2 : mesurage de la concentration de l'uranium dans l'eau par spectroscopie d'émission atomique avec plasma couplé par induction
M60 805-3	sept 2005	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	uranium	Partie 3 : mesurage de la concentration de l'uranium dans l'eau par scintillation liquide alpha
M60 805-4	Décembre-05	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	uranium	Partie 4 : mesurage de la concentration de l'uranium dans l'eau par spectroscopie de masse avec plasma couplé par induction
M60 805-5	Décembre-05	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	uranium	Partie 5 : mesurage de la concentration de l'uranium dans l'eau par spectroscopie alpha
M60 806-1	Mai 2005	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	Strontium 90	Partie 1 : mesurage de l'activité du strontium 90 dans les eaux – séparation radiochimique du strontium 90 par l'acide nitrique et mesurage de l'activité béta de l'yttrium 90
M60 806-2	Mai 2005	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT -EAU	Strontium 90	Partie 2 : mesurage de l'activité du strontium 90 dans les eaux – extraction par solvant organique de l'yttrium 90 et mesurage de l'activité béta
M60 806-3	Mai 2005	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT-EAU	Strontium 90	Partie 3 : mesurage de l'activité du strontium 90 dans les eaux – séparation radiochimique du strontium 90 par extraction sur résine de type 'éther-couronne' et mesurage de l'activité béta

M60 807	sept 2006	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT-EAU	Plomb 210	mesurage de la concentration du plomb 210 par spectroscopie alpha
REFERENCE	**DATE**	**DESIGNATION**	**Mots clés**	**SOUS-TITRE**
M60-810	novembre-06	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT	gamma	Mesure des radionucléides du sol par spectrométrie gamma in-situ dans l'environnement
M60 812-1	novembre-06	MESURE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT	Carbone 14	Partie 1 : Guide du mesurage de l'activité volumique de l'air en C14 à partir d'un prélèvement atmosphérique
PR NF ISO 9698	octobre-09	QUALITE DE L'EAU	tritium	qualité de l'eau - détermination de l'activité volumique du tritium - méthode par comptage des scintillation en milieu liquide

Annexe 8 EVALUATION QUANTITATIVE DES EXPOSITIONS RADIOLOGIQUES

1- Introduction

Le but de cette annexe est de donner les éléments nécessaires aux évaluations quantitatives des expositions radiologiques (EQER). Après avoir indiqué les limites et précisé quelques éléments d'ordre méthodologique et contextuel, la description de différents scénarios est faite, suivie de la formulation permettant de calculer les expositions. Des valeurs acceptables ou des indications méthodologiques quant à leur choix ou encore des références pour les paramètres nécessaires pour ces calculs sont proposées.

2- EQER

EQER est l'acronyme retenu dans ce guide pour Evaluation Quantitative des Expositions Radiologiques, et correspond à des calculs de dose efficace, généralement à des personnes du public, mais parfois aussi le cas échéant à des travailleurs du nucléaire. Il faut entendre par personne du public des personnes au sens large de la population générale, sous-entendu par opposition aux travailleurs du nucléaire auxquels s'appliquent non seulement une règlementation spécifique mais aussi des modes spécifiques de calculs des doses consécutives aux expositions.

Dans un contexte d'interprétation de l'état des milieux, les doses sont calculées à partir de la connaissance radiologique de l'état des milieux, c'est-à-dire généralement les activités (volumiques ou massiques des radionucléides) dans les différents compartiments de l'environnement.

Dans un contexte de plan de gestion, les doses sont calculées à partir des activités connues ou postulées dans chacun des compartiments de l'environnement.

Dans la phase initiale du plan de gestion, les doses peuvent être calculées, avant assainissement, pour permettre de mesurer le gain dosimétrique obtenu par l'assainissement.

Dans le cadre du bilan coût-avantage, mené au cours du plan de gestion, les évaluations dosimétriques sont conduites de manière prédictives sur la base des objectifs d'assainissement retenus et d'activités calculées dans certains compartiments de l'environnement à partir des activités connues ou postulées dans d'autres compartiments de l'environnement.

3- LIEUX D'EXPOSITION

Pour faire des EQER, il est nécessaire de disposer du schéma conceptuel. Les lieux dont la fréquentation génère une exposition sont décrits comme suit :

- l'intérieur (des bâtiments), caractérisé par un débit de dose ambiant créé par les surfaces des murs, sols et plafonds (notamment dans le cas d'un bâtiment partiellement dépollué), un empoussièrement créé par des activités humaines[5] provisoires ou permanentes exécutées à l'intérieur du bâtiment (réfection de murs dans un bâtiment partiellement décontaminé par exemple) mais aussi à l'extérieur du bâtiment (activités de jardins par exemple)
- l'extérieur (des bâtiments), pour lequel plusieurs types de surfaces sont à considérer :
  - les surfaces nues pour lesquelles la pollution affleure. Seront distingués :
    - les espaces verts, zones herbeuses de type pelouse ou prairie par exemple ;
    - les potagers ;
    - les berges de cours d'eau, de mare ou d'étang, voire de plan d'eau (base de loisirs par exemple) ; surfaces pour lesquelles les sédiments affleurent ;
    - les surfaces aquatiques des volumes d'eau polluée ;
  - les surfaces couvertes par des matériaux assurant une protection contre les rayonnements (bitume, béton, gravillons, terre rapportée, lame d'eau, etc.) des radionucléides du sol sous-jacent.

4- RADIONUCLEIDES CONSIDERES

Les radionucléides considérés dans ce guide sont ceux indiqués dans la première colonne du tableau I ; la période radioactive T est indiquée entre parenthèses. Pour chaque radionucléide considéré, la filiation radioactive est précisée dans la seconde colonne du tableau I. Les périodes radioactives sont extraites de la publication 38 de la Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements (CIPR) [1].

[5] La remise en suspension naturelle de radionucléides déposés à la surface du sol n'est pas considérée dans ce guide.

2249 # Tableau I : Radionucléides

Radionucléide (T)	Filiation radioactive (T)
^{3}H (12,35 ans)	-
^{14}C (5730 ans)	-
^{40}K (1 280 000 000 ans)	-
^{54}Mn (312,5 jours)	-
^{57}Co (270,9 jours)	-
^{60}Co (5,271 ans)	-
^{63}Ni (96 ans)	-
^{90}Sr (29,12 ans)	^{90}Y (64 heures)
^{129}I (15 700 000 ans)	-
^{137}Cs (30 ans)	^{137m}Ba (2,552 minutes)
^{210}Pb (22,3 ans)	^{210}Bi (5,012 jours), ^{210}Po (138,38 jours)
^{210}Po (138,38 jours)	-
^{226}Ra (1600 ans)	^{222}Rn (3,8235 jours), ^{218}Po (3,05 minutes), ^{214}Pb (26,8 minutes), ^{214}Bi (19,9 minutes), ^{214}Po (164,3 microsecondes), ^{210}Pb (22,3 ans), ^{210}Bi (5,012 jours), ^{210}Po (138,38 jours)
^{228}Ra (5,75 ans)	^{228}Ac (6,13 heures), ^{228}Th (1,9131 ans), ^{224}Ra (3,66 jours), ^{220}Rn (55,6 secondes), ^{216}Po (0,15 seconde), ^{212}Pb (10,64 heures), ^{212}Bi (60,55 minutes), ^{212}Po (0,305 microsecondes), ^{208}Tl (3,07 minutes)
^{227}Ac (21,773 ans)	^{227}Th (18,718 jours), ^{223}Fr (21,8 minutes), ^{223}Ra (11,434 jours), ^{219}Rn (3,96 secondes), ^{215}Po (1,78 milliseconde), ^{211}Pb (36,1 minutes), ^{211}Bi (2,14 minutes), ^{211}Po (0,516 seconde), ^{207}Tl (4,77 minutes)
^{228}Th (1,9131 ans)	^{224}Ra (3,66 jours), ^{220}Rn (55,6 secondes), ^{216}Po (0,15 seconde), ^{212}Pb (10,64 heures), ^{212}Bi (60,55 minutes), ^{212}Po (0,305 microsecondes), ^{208}Tl (3,07 minutes)
^{230}Th (77 000 ans)	^{226}Ra (1600 ans), ^{222}Rn (3,8235 jours), ^{218}Po (3,05 minutes), ^{214}Pb (26,8 minutes), ^{214}Bi (19,9 minutes), ^{214}Po (164,3 microsecondes), ^{210}Pb (22,3 ans), ^{210}Bi (5,012 jours), ^{210}Po (138,38 jours)
^{232}Th (14 050 000 000 ans)	^{228}Ra (5,75 ans), ^{228}Ac (6,13 heures), ^{228}Th (1,9131 ans), ^{224}Ra (3,66 jours), ^{220}Rn (55,6 secondes), ^{216}Po (0,15 seconde), ^{212}Pb (10,64 heures), ^{212}Bi (60,55 minutes), ^{212}Po (0,305 microsecondes), ^{208}Tl (3,07 minutes)
^{234}U (244 500 ans)	^{230}Th (77 000 ans), ^{226}Ra (1600 ans), ^{222}Rn (3,8235 jours), ^{218}Po (3,05 minutes), ^{214}Pb (26,8 minutes), ^{214}Bi (19,9 minutes), ^{214}Po (164,3 microsecondes), ^{210}Pb (22,3 ans), ^{210}Bi (5,012 jours), ^{210}Po (138,38 jours)
^{235}U (703 800 000 ans)	^{231}Th (25,52 heures), ^{231}Pa (32760 ans), ^{227}Ac (21,773 ans), ^{227}Th (18,718 jours), ^{223}Fr (21,8 minutes), ^{223}Ra (11,434 jours), ^{219}Rn (3,96 secondes), ^{215}Po (1,78 milliseconde), ^{211}Pb (36,1 minutes), ^{211}Bi (2,14 minutes), ^{211}Po (0,516 seconde), ^{207}Tl (4,77 minutes)
^{236}U (23 415 000 ans)	^{232}Th (14 050 000 000 ans), ^{228}Ra (5,75 ans), ^{228}Ac (6,13 heures), ^{228}Th (1,9131 ans), ^{224}Ra (3,66 jours), ^{220}Rn (55,6 secondes), ^{216}Po (0,15 seconde), ^{212}Pb (10,64 heures), ^{212}Bi (60,55 minutes), ^{212}Po (0,305 microsecondes), ^{208}Tl (3,07 minutes)
^{238}U (4 468 000 000 ans)	^{234}Th (24,1 jours), ^{234m}Pa (1,17 minute), ^{234}Pa (6,7 heures), ^{234}U (244 500 ans), ^{230}Th (77 000 ans), ^{226}Ra (1600 ans), ^{222}Rn (3,8235 jours), ^{218}Po (3,05 minutes), ^{214}Pb (26,8 minutes), ^{214}Bi (19,9 minutes), ^{214}Po (164,3 microsecondes), ^{210}Pb (22,3 ans), ^{210}Bi (5,012 jours), ^{210}Po (138,38 jours)
^{238}Pu (87,74 ans)	^{234}U (244 500 ans), ^{230}Th (77 000 ans), ^{226}Ra (1600 ans), ^{222}Rn (3,8235 jours), ^{218}Po (3,05 minutes), ^{214}Pb (26,8 minutes), ^{214}Bi (19,9 minutes), ^{214}Po (164,3 microsecondes), ^{210}Pb (22,3 ans), ^{210}Bi (5,012 jours), ^{210}Po (138,38 jours)
^{239}Pu (24 065 ans)	^{235}U (703 800 000 ans), ^{231}Th (25,52 heures), ^{231}Pa (32760 ans), ^{227}Ac (21,773 ans), ^{227}Th (18,718 jours), ^{223}Fr (21,8 minutes), ^{223}Ra (11,434 jours), ^{219}Rn (3,96 secondes), ^{215}Po (1,78 milliseconde), ^{211}Pb (36,1 minutes), ^{211}Bi (2,14 minutes), ^{211}Po (0,516 seconde), ^{207}Tl (4,77 minutes)

Tableau I (suite) : Radionucléides

Radionucléide (T)	Filiation radioactive (T)
^{240}Pu (6537 ans)	^{236}U (23 415 000 ans), ^{232}Th (14 050 000 000 ans), ^{228}Ra (5,75 ans), ^{228}Ac (6,13 heures), ^{228}Th (1,9131 ans), ^{224}Ra (3,66 jours), ^{220}Rn (55,6 secondes), ^{216}Po (0,15 seconde), ^{212}Pb (10,64 heures), ^{212}Bi (60,55 minutes), ^{212}Po (0,305 microsecondes), ^{208}Tl (3,07 minutes)
^{241}Pu (14,4 ans)	^{237}U (6,75 jours), ^{241}Am (432,2 ans), ^{237}Np (2 140 000 ans), ^{233}Pa (27 jours), ^{233}U (158 000 ans), ^{229}Th (7340 ans), ^{225}Ra (14,8 jours), ^{225}Ac (10 jours), ^{221}Fr (4,8 minutes), ^{217}At (0,0323 seconde), ^{213}Bi (45,65 minutes), ^{213}Po (4,2 microsecondes), ^{209}Tl (2,2 minutes), ^{209}Pb (3,253 heures)
^{241}Am (432,2 ans)	^{237}Np (2 140 000 ans), ^{233}Pa (27 jours), ^{233}U (158 000 ans), ^{229}Th (7340 ans), ^{225}Ra (14,8 jours), ^{225}Ac (10 jours), ^{221}Fr (4,8 minutes), ^{217}At (0,0323 seconde), ^{213}Bi (45,65 minutes), ^{213}Po (4,2 microsecondes), ^{209}Tl (2,2 minutes), ^{209}Pb (3,253 heures)
^{252}Cf (2,638 ans)	^{248}Cm (339 000 ans), ^{244}Pu (82 600 000 ans), ^{240}U (14,1 heures), ^{240}Np (65 minutes), ^{240}Pu (6537 ans), ^{236}U (23 415 000 ans), ^{232}Th (14 050 000 000 ans), ^{228}Ra (5,75 ans), ^{228}Ac (6,13 heures), ^{228}Th (1,9131 ans), ^{224}Ra (3,66 jours), ^{220}Rn (55,6 secondes), ^{216}Po (0,15 seconde), ^{212}Pb (10,64 heures), ^{212}Bi (60,55 minutes), ^{212}Po (0,305 microsecondes), ^{208}Tl (3,07 minutes)

5- COEFFICIENTS DE DOSE ET DPUI

L'exposition des personnes aux rayonnements ionisants est quantifiée avec le calcul de la dose efficace.

L'utilisateur devra choisir les valeurs de coefficients de dose et de doses par unité d'incorporation (DPUI) en fonction du contexte de l'étude (travailleur versus public, classe d'âge, granulométrie et forme physicochimique). L'utilisateur aura donc le choix de ses sources de valeurs de coefficients de dose et de DPUI, et pourra consulter utilement :

- l'arrêté du 1er septembre 2003 [2] qui fournit les DPUI efficaces pour l'exposition interne par inhalation et par ingestion pour les différentes classe d'âge, mais ne traite pas des DPUI équivalentes ;
- le rapport dit Federal Guidance 12 [3] pour les coefficients de dose pour les expositions externes à l'atmosphère contaminée ou aux dépôts au sol qui traite des doses équivalentes mais ne traite pas des classes d'âge.

Pour des calculs de dose due à des expositions externes, l'utilisateur pourra en première approximation considérer que les coefficients de dose par exposition externe sont indépendants de l'âge de la personne exposée.

Plus généralement, l'utilisateur pourra consulter la base de données ECRIN de l'IRSN [4] [5], qui compile plusieurs sources de données de DPUI et de coefficients de dose, à l'exception notable toutefois des données de l'arrêté du 1er septembre 2003. La base de données ECRIN est accessible sur le site Internet http://www-ecrin.irsn.org/ ou depuis le site Internet de l'institut www.irsn.fr.

L'utilisateur qui le souhaite peut calculer une dose équivalente (à l'organe) ; il lui suffira pour cela de remplacer les coefficients de dose efficace pour l'exposition externe et les doses efficaces par unité d'incorporation (DPUI) pour l'exposition interne par les valeurs correspondantes de coefficients de dose équivalente pour l'exposition externe pour l'organe considéré, et les valeurs correspondantes de doses équivalentes par unité d'incorporation pour l'exposition interne pour l'organe considéré. Pour des calculs de

dose équivalente due à des expositions internes, l'utilisateur pourra consulter le CD ROM de la CIPR en référence [6].

6- PERSONNES EXPOSEES

A priori, n'importe quelle personne peut être exposée. Toutefois, les spécificités de certains scénarios peuvent conduire à ne pas considérer l'exposition de tel ou tel groupe de la population.

En toute rigueur, chaque personne a ses propres valeurs des paramètres nécessaires au calcul de son exposition. Comme il n'est pas possible de faire autant de calculs que de jeux différents de valeurs de paramètres, une répartition de la population en classes d'âge est faite, permettant d'utiliser des valeurs moyennes des paramètres pour les individus d'une même classe.

Chaque classe d'âge est caractérisée par :

- un débit respiratoire dépendant des activités pratiquées ;
- un régime alimentaire (quantité d'aliments consommés et degré d'autarcie), dépendant notamment de la zone géographique et/ou du mode de vie ;
- une consommation d'eau ;
- un budget temps, représentant le temps passé à diverses activités et/ou en différents endroits ;
- une consommation par inadvertance de sol ;
- une consommation par inadvertance d'eau par baignade.

A titre indicatif, la CIPR propose, dans sa publication 66 [7], de répartir la population selon six classes d'âge :

- les nourrissons (enfants de moins de 1 an) ;
- les enfants de 1 à 2 ans (dénommés ci-après enfants de 1 an) ;
- les enfants de 3 à 7 ans (dénommés ci-après enfants de 5 ans) ;
- les enfants de 8 à 12 ans (dénommés ci-après enfants de 10 ans), et selon les deux sexes ;
- les enfants de 13 à 17 ans (dénommés ci-après adolescents), et selon les deux sexes ;
- les adultes (d'âge supérieur ou égal à 18 ans), et selon les deux sexes.

7- ACTIVITES ET VOIES D'EXPOSITION

7.1 Généralités

Les activités des personnes présentes sur un site pollué par des radionucléides conduisent à l'exposition de ces personnes aux rayonnements de ces radionucléides. En toute rigueur, à chaque activité correspondrait donc un ensemble de voies d'exposition avec une formulation de la dose qui en résulterait. Les activités humaines pouvant se décliner à l'infini, il n'est pas possible de les décrire de manière exhaustive, d'autant qu'une même voie d'exposition peut concerner plusieurs activités (comme l'inhalation par exemple). La recherche d'un compromis entre le détail des calculs — permettant de rendre compte de la variété des activités — et leur nombre conduit à regrouper les activités en fonction du contexte de l'étude. A ces activités sont attachés des

paramètres représentatifs permettant d'effectuer le calcul de la dose consécutive à l'exposition due à cette activité. Dans le présent guide, les activités de l'homme sont représentées comme suit :

- **le sommeil** : l'individu dort et est immobile, dans une pièce d'un bâtiment ou d'une résidence ;
- **les activités usuelles** : il s'agit de l'ensemble des activités quotidiennes d'un individu, en privé ou au travail, réparties en trois catégories : le repos correspondant à une activité physique faible (la lecture ou le travail sur ordinateur par exemples), l'exercice léger (la marche ou le travail sur la machine d'un atelier par exemples), l'exercice lourd (le sport ou le bêchage d'un potager par exemples). En particulier, dans ce guide, les activités professionnelles font partie des activités usuelles ;
- **les travaux** : il s'agit, dans ce guide, de travaux de durée limitée, d'intérieur (réfection d'un mur par exemple) ou d'extérieur (terrassement), ayant la particularité de remettre en suspension dans l'air une quantité, supposée significative a priori, de radionucléides du milieu travaillé, et venant s'ajouter à la quantité déjà présente dans l'atmosphère dans laquelle évolue les personnes présentes ;
- **les activités nautiques** : il s'agit des activités récréatives associées à des plans d'eau (pêche, baignade, jeux de plage au bord de l'eau, planche à voile, voile, canoë-kayak, etc.).

Les voies d'exposition correspondent à un mode d'exposition associé à une présence ou à l'exercice d'une ou plusieurs activités. On distingue traditionnellement deux modes d'exposition :

- l'exposition externe, quand le corps humain reçoit des rayonnements en provenance de sources qui lui sont extérieures ;
- l'exposition interne, quand le corps humain reçoit des rayonnements en provenance de sources qui lui sont intérieures.

Les voies d'exposition caractérisent plus finement les modes d'exposition ; on distingue ainsi traditionnellement :

- pour l'exposition externe : l'exposition par immersion dans une atmosphère — contenant des radionucléides émettant des rayonnements, l'exposition aux dépôts (rayonnements émis par des radionucléides déposés à la surface du sol ou dans son épaisseur), l'exposition aux sources (fûts par exemple) déposée à la surface du sol ou dans son épaisseur et l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents sur la surface des murs des bâtiments ou dans leur épaisseur ;
- pour l'exposition interne : l'exposition par inhalation (de l'air d'une atmosphère contenant des radionucléides) et l'exposition par ingestion (incorporation de radionucléides par alimentation ou boisson, voire par inadvertance de sol ou d'eau).

D'autres subdivisions peuvent encore être faites au fur et à mesure que l'on caractérise précisément une exposition.

A chaque voie d'exposition correspond une formulation du calcul de la dose qui en résulte, avec les paramètres afférents.

Les voies d'exposition considérées peuvent être, la liste suivante n'étant pas nécessairement exhaustive :

- l'exposition interne par inhalation à l'intérieur – sommeil ;
- l'exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles ;
- l'exposition interne par inhalation à l'intérieur – travaux intérieurs ;
- l'exposition interne par inhalation à l'intérieur – travaux extérieurs ;
- l'exposition externe à l'air à l'intérieur – sommeil ;
- l'exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles ;
- l'exposition externe à l'air à l'intérieur – travaux intérieurs ;
- l'exposition externe à l'air à l'intérieur – travaux extérieurs ;
- l'exposition externe aux parois à l'intérieur – sommeil ;
- l'exposition externe aux parois à l'intérieur – hors sommeil ;
- l'exposition interne par inhalation à l'extérieur ;
- l'exposition interne par inhalation à l'extérieur – travaux extérieurs ;
- l'exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles ;
- l'exposition externe à l'air à l'extérieur – travaux extérieurs ;
- l'exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes ;
- l'exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts ;
- l'exposition externe au dépôt à l'extérieur – potager ;
- l'exposition externe au dépôt à l'extérieur – berges ;
- l'exposition externe à un plan d'eau à l'extérieur ;
- l'exposition externe à l'extérieur – baignade ;
- l'exposition interne par ingestion d'eau par inadvertance ;
- l'exposition interne par ingestion d'aliments ;
- l'exposition interne par ingestion d'eau de boisson ;
- l'exposition interne par ingestion de sol par inadvertance.

7.2 Données et paramètres

L'évaluation quantitative de l'exposition radiologique nécessite d'avoir des valeurs pour les données et les paramètres de chacune des voies d'exposition.

Les données sont les données radiologiques d'entrée et peuvent être :

- l'activité volumique de l'air à l'intérieur du bâtiment — en $Bq.m^{-3}$;
- l'activité volumique de l'air à l'extérieur du bâtiment — en $Bq.m^{-3}$ [6];
- le débit de dose ambiant (gamma et bêta) dans le bâtiment — en $\mu Sv.h^{-1}$;
- le débit de dose ambiant (gamma et bêta) à l'extérieur du bâtiment, en distinguant en tant que de besoin entre les surfaces couvertes, les espaces verts, le potager, les berges du plan d'eau — en $\mu Sv.h^{-1}$;

[6] Lorsque la situation le justifie, l'énergie alpha potentielle des descendants à vie courte du radon ($nJ.m^{-3}$) peut également être considérée dans le calcul d'exposition.

- l'activité massique du sol, en distinguant en tant que de besoin entre les surfaces couvertes, les espaces verts, le potager, les berges du plan d'eau — en $Bq.g^{-1}$;
- l'activité massique des structures des bâtiments— en $Bq.g^{-1}$;
- l'activité volumique de l'eau du puits et celle de l'eau du plan d'eau — en $Bq.L^{-1}$;
- l'activité massique dans les produits consommés : légumes feuilles, les légumes fruits, les légumes racines et les pommes de terre du potager, mais aussi les produits d'origine animale (lait, viande, poisson) issus d'animaux occupant les lieux (élevage, chasse, pêche), ou encore les produits de cueillette (baies, champignons) — en $Bq.kg^{-1}$.

Les paramètres sont :

- le budget temps par activité — $h.j^{-1}$ ou $h.an^{-1}$;
- le débit respiratoire — en $m^3.h^{-1}$;
- le facteur d'atténuation des rayonnements des radionucléides du sol par la surface qui le recouvre et qui joue le rôle de protection biologique — sans dimension ;
- le nombre de jours considéré pour le scénario — en $j.an^{-1}$;
- l'empoussièrement consécutif à un travail ponctuel — en $g.m^{-3}$;
- la fraction inhalable des aérosols remis en suspension par un travail ponctuel — sans dimension ;
- le régime alimentaire des produits consommés : légumes feuilles, les légumes fruits, les légumes racines et les pommes de terre du potager, mais aussi des produits d'origine animale (lait, viande) issus d'animaux occupant les lieux, ou encore des produits de cueillette (baies, champignons) — en $kg.an^{-1}$;
- le degré d'autarcie des consommateurs pour les produits consommés : légumes feuilles, les légumes fruits, les légumes racines et les pommes de terre du potager, mais aussi les produits d'origine animale (lait, viande) issus d'animaux occupant les lieux, ou encore les produits de cueillette (baies, champignons) — sans dimension ;
- la quantité d'eau de boisson provenant du puits — en $L.an^{-1}$;
- la quantité d'eau ingérée par inadvertance lors de baignades — en $L.an^{-1}$;
- la quantité de sol ingéré par inadvertance — en $g.an^{-1}$;
- le facteur de transfert de l'eau au poisson — en $m^3.kg^{-1}$;
- la masse volumique du sol non couvert (espaces verts, potager, berges de plan d'eau) — en $kg.m^{-3}$;
- le facteur de transfert du sol aux légumes feuilles, les légumes fruits, les légumes racines et les pommes de terre du potager — en $kg_{sol\ sec}.kg^{-1}_{végétal\ frais}$;
- les coefficients de dose — en $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$ et en $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^2$ — et les DPUI — en $mSv.Bq^{-1}$.

Des valeurs de la littérature sont proposées au chapitre 10 pour certains de ces paramètres. Il ne s'agit en aucun cas de valeurs par défaut proposées par ce guide. Il appartient à l'auteur des évaluations quantitatives d'exposition radiologique de s'interroger, à l'endroit de chaque paramètre, de la valeur pertinente à retenir et d'effectuer les recherches nécessaires pour des valeurs appropriées à son étude.

7.3 Formulations

Les voies d'exposition considérées dans ce guide sont présentées ci-après, distinguant notamment le mode d'exposition et l'activité à l'origine de l'exposition, avec la formulation du calcul de la dose consécutive à l'exposition considérée. Le glossaire du chapitre 9 fournit des précisions sur les grandeurs, les paramètres et leurs unités.

Les formulations proposées considèrent implicitement que chaque donnée d'entrée est homogène[7] sur tout le lieu sur lequel on la considère. Dans le cas inverse d'inhomogénéité susceptible d'affecter sensiblement les évaluations quantitatives d'exposition radiologique, il sera nécessaire de répéter les calculs autant de fois qu'il y aura de zones identifiées considérées homogènes (un certain nombre de paramètres, notamment les budgets temps devront être adaptés en conséquence). Par exemple, si l'activité du sol des espaces verts n'est pas constante et prend deux valeurs, il faudra :

- soit traiter deux espaces verts, chacun avec l'activité du sol correspondante et distribuer le budget temps associé aux espaces verts sur chacun des deux considérés au prorata des surfaces de chacun ;
- soit ne considérer qu'un seul espace vert avec une activité du sol obtenue à partir de chacune des deux activités observées pondérées par les surfaces correspondantes.

Les formulations possibles des doses efficaces associées aux diverses voies d'exposition sont présentées ci-dessous, en fonction du radionucléide rn et de la classe d'âge ca. Dans le cas où il y a plusieurs radionucléides à considérer, il faut ajouter les doses obtenues pour chaque radionucléide. Les formulations sont présentées pour des scénarios de durée un an et les doses calculées sont donc des doses annuelles ; toutefois d'autres durées peuvent être considérées.

- **Exposition interne par inhalation à l'intérieur – sommeil**. Il s'agit de l'incorporation par inhalation des radionucléides présents dans l'atmosphère du bâtiment pendant que la personne dort. La dose qui en résulte s'exprime comme suit[8] :

$$E_{inhalation-\text{int}érieur-sommeil}(rn,ca) = A_{air-\text{int}érieur}(rn).D_r(ca).BT_{sommeil}(ca).N.DPUI_{inhalation}(rn,ca) \quad \textbf{Eq. 1}$$

$E_{inhalation\text{-}intérieur\text{-}sommeil}$: Dose efficace par inhalation pendant le sommeil, $mSv.an^{-1}$
$A_{air\text{-}intérieur}$: Activité volumique de l'air dans les bâtiments, $Bq.m^{-3}$
D_r : Débit respiratoire, $m^3.h^{-1}$
$BT_{sommeil}$: Budget temps consacré au sommeil, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$DPUI_{inhalation}$: Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, $mSv.Bq^{-1}$

[7] Une grandeur est homogène sur un lieu quand sa valeur est la même en tout point de ce lieu.

[8] Pour les descendants à vie courte du radon, la dose peut être calculée à partir de mesures d'énergie alpha potentielle (EAP) et des facteurs de conversion préconisés par l'arrêté du premier septembre 2003 [2].

- **Exposition interne par inhalation à l'intérieur - activités usuelles**. Il s'agit de l'incorporation par inhalation des radionucléides présents dans l'atmosphère du bâtiment pendant l'exécution d'activités usuelles dans un habitat ou un lieu professionnel. La dose qui en résulte s'exprime comme suit[3] :

$$E_{inhalation-intérieur-activités\,usuelles}(rn,ca) = A_{air-intérieur}(rn).D_r(ca).BT_{intérieur-hors\,sommeil}(ca).N.DPUI_{inhalation}(rn,ca) \quad \textbf{Eq. 2}$$

$E_{inhalation-intérieur-activités\,usuellesl}$: Dose efficace par inhalation à l'intérieur pendant l'exercice d'activités usuelles, mSv.an^{-1}
$A_{air-intérieur}$: Activité volumique de l'air dans les bâtiments, Bq.m^{-3}
D_r : Débit respiratoire, m^3.h^{-1}
$BT_{intérieur-hors\,sommeil}$: Budget temps passé à l'intérieur hors sommeil, h.j^{-1}
N : Nombre de jours considérés, j.an^{-1}
$DPUI_{inhalation}$: Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, mSv. Bq^{-1}

- **Exposition interne par inhalation à l'intérieur - travaux intérieurs**. Il s'agit de l'incorporation par inhalation des radionucléides ajoutés dans l'atmosphère du bâtiment par une activité sur les structures de celui-ci et générant un empoussièrement. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{inhalation-\mathbf{int}érieur-travaux\,\mathbf{int}érieurs}(rn,ca) = A_{structures}(rn).Emp_{\mathbf{int}érieur-\mathbf{int}érieur}.F_{inhalable}.D_r(ca).BT_{travaux-\mathbf{int}érieurs}(ca).DPUI_{inhalation}(rn,ca) \quad \textbf{Eq. 3}$$

$E_{inhalation-intérieur-travaux\,intérieurs}$: Dose efficace par inhalation à l'intérieur pendant l'exécution de travaux intérieurs, mSv.an^{-1}
$A_{structures}$: Activité massique dans les structures des bâtiments (sol, murs et plafonds), Bq.g^{-1}
$Emp_{intérieur-intérieur}$: Empoussièrement à l'intérieur pour une activité pratiquée à l'intérieur, g.m^{-3}
$F_{inhalable}$: Fraction inhalable des aérosols générés par une activité pratiquée à l'intérieur, -
$BT_{travaux-intérieurs}$: Budget temps consacré à des travaux intérieurs, h.an^{-1}
$DPUI_{inhalation}$: Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, mSv. Bq^{-1}

- **Exposition interne par inhalation à l'intérieur - travaux extérieurs**. Il s'agit de l'incorporation par inhalation des radionucléides ajoutés dans l'atmosphère du bâtiment par une activité à l'extérieur de celui-ci et générant un empoussièrement à l'intérieur. La dose qui en résulte s'exprime comme suit[3] :

$$E_{inhalation-\mathbf{int}érieur-travaux\,extérieurs}(rn,ca) = A_{sol}(rn).Emp_{\mathbf{int}érieur-extérieur}.F_{inhalable}.D_r(ca).BT_{travaux-extérieurs}(ca).DPUI_{inhalation}(rn,ca) \quad \textbf{Eq. 4}$$

$E_{inhalation-intérieur-travaux\,extérieurs}$: Dose efficace par inhalation à l'intérieur pendant l'exécution de travaux extérieurs, mSv.an^{-1}
A_{sol} : Activité massique d'un sol extérieur : surface couverte, ou espace vert, ou potager ou berge, Bq.g^{-1}
$Emp_{intérieur-extérieur}$: Empoussièrement à l'intérieur pour une activité pratiquée à l'extérieur, g.m^{-3}
$F_{inhalable}$: Fraction inhalable des aérosols générés par des travaux extérieurs, -
D_r : Débit respiratoire, m^3.h^{-1}
$BT_{travaux-extérieurs}$: Budget temps consacré à des travaux extérieurs, h.an^{-1}
$DPUI_{inhalation}$: Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, mSv. Bq^{-1}

- **Exposition externe à l'air à l'intérieur - sommeil**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans l'atmosphère du bâtiment pendant que la personne dort. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{panache-intérieur-sommeil}(rn, ca) = A_{air-intérieur}(rn).BT_{sommeil}(ca).N.3600.CD_{panache}(rn) \quad \textbf{Eq. 5}$$

$E_{panache-intérieur-sommeil}$: Dose efficace par exposition externe à l'air pendant le sommeil, $mSv.an^{-1}$
$A_{air-intérieur}$: Activité volumique de l'air dans les bâtiments, $Bq.m^{-3}$
$BT_{sommeil}$: Budget temps consacré au sommeil, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$CD_{panache}$: Coefficient de dose par exposition externe à l'air, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$

- **Exposition externe à l'air à l'intérieur - activités usuelles**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans l'atmosphère du bâtiment pendant l'exécution d'activités usuelles dans un habitat ou un lieu professionnel. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{panache-intérieur-activités\ usuelles}(rn, ca) = A_{air-intérieur}(rn).BT_{intérieur-hors\ sommeil}(ca).N.3600.CD_{panache}(rn) \quad \textbf{Eq. 6}$$

$E_{panache-intérieur-activités\ usuellesl}$: Dose efficace par exposition externe à l'air à l'intérieur pendant l'exercice d'activités usuelles, $mSv.an^{-1}$
$A_{air-intérieur}$: Activité volumique de l'air dans les bâtiments, $Bq.m^{-3}$
$BT_{intérieur-hors\ sommeil}$: Budget temps passé à l'intérieur hors sommeil, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$CD_{panache}$: Coefficient de dose par exposition externe à l'air, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$

- **Exposition externe à l'air à l'intérieur - travaux intérieurs**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides ajoutés dans l'atmosphère du bâtiment par une activité sur les structures de celui-ci et générant un empoussièrement. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{panache-intérieur-travaux\ intérieurs}(rn, ca) = A_{structures}(rn).Emp_{intérieur-intérieur}.BT_{travaux-intérieurs}(ca).3600.CD_{panache}(rn) \quad \textbf{Eq. 7}$$

$E_{panache-intérieur-travaux\ intérieurs}$: Dose efficace par exposition externe à l'air à l'intérieur pendant l'exécution de travaux intérieurs, $mSv.an^{-1}$
$A_{structures}$: Activité massique dans les structures des bâtiments (sol, murs et plafonds), $Bq.g^{-1}$
$Emp_{intérieur-intérieur}$: Empoussièrement à l'intérieur pour une activité pratiquée à l'intérieur, $g.m^{-3}$
$BT_{travaux-intérieurs}$: Budget temps consacré à des travaux intérieurs, $h.an^{-1}$
$CD_{panache}$: Coefficient de dose par exposition externe à l'air, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$

- **Exposition externe à l'air à l'intérieur - travaux extérieurs**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides ajoutés dans l'atmosphère du bâtiment par une activité à l'extérieur de celui-ci et générant un empoussièrement à l'intérieur. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{panache-intérieur-travaux\ extérieurs}(rn, ca) = A_{sol}(rn).Emp_{intérieur-extérieur}.BT_{travaux-extérieurs}(ca).3600.CD_{panache}(rn) \quad \textbf{Eq. 8}$$

$E_{panache-intérieur-travaux\ extérieurs}$: Dose efficace par exposition externe à l'air à l'intérieur pendant l'exécution de travaux extérieurs, $mSv.an^{-1}$
A_{sol} : Activité massique d'un sol extérieur : surface couverte, ou espace vert, ou potager ou berge, $Bq.g^{-1}$
$Emp_{intérieur-extérieur}$: Empoussièrement à l'intérieur pour une activité pratiquée à l'extérieur, $g.m^{-3}$
$BT_{travaux-extérieurs}$: Budget temps consacré à des travaux extérieurs, $h.an^{-1}$
$CD_{panache}$: Coefficient de dose par exposition externe à l'air, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$

- **Exposition externe aux parois à l'intérieur - sommeil**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans les structures du bâtiment pendant que la personne dort. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{dépôt-intérieur-sommeil}(rn, ca) = DD_{intérieur}.10^{-3}.BT_{sommeil}(ca).N \quad \textbf{Eq. 9}$$

$E_{dépôt-intérieur-sommeil}$: Dose efficace par exposition externe aux parois pendant le sommeil, $mSv.an^{-1}$
$DD_{intérieur}$: Débit de dose à l'intérieur des bâtiments, $\mu Sv.h^{-1}$
$BT_{sommeil}$: Budget temps consacré au sommeil, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$

- **Exposition externe aux parois à l'intérieur - hors sommeil**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans les structures du bâtiment pendant que la personne est à l'intérieur de celui-ci mais ne dort pas. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{dépôt-intérieur-hors\ sommeil}(ca) = DD_{intérieur}.10^{-3}.BT_{intérieur-hors\ sommeil}(ca).N \quad \textbf{Eq. 10}$$

$E_{dépôt-intérieur-hors\ sommeil}$: Dose efficace par exposition externe aux parois hors sommeil, $mSv.an^{-1}$
$DD_{intérieur}$: Débit de dose à l'intérieur des bâtiments, $\mu Sv.h^{-1}$
$BT_{intérieur-hors\ sommeil}$: Budget temps passé à l'intérieur hors sommeil, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$

- **Exposition interne par inhalation à l'extérieur**. Il s'agit de l'incorporation par inhalation des radionucléides présents dans l'atmosphère à l'extérieur du bâtiment pendant que la personne séjourne à l'extérieur (du bâtiment et sur le site) . La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{inhalation-extérieur}(rn,ca) = A_{air-extérieur}(rn).D_r(ca).BT_{extérieur}(ca).N.DPUI_{inhalation}(rn,ca) \quad \textbf{Eq. 11}$$

$E_{inhalation-extérieur}$: Dose efficace par inhalation à l'extérieur, $mSv.an^{-1}$
$A_{air-extérieur}$: Activité volumique de l'air à l'extérieur, $Bq.m^{-3}$
D_r : Débit respiratoire, $m^3.h^{-1}$
$BT_{extérieur}$: Budget temps passé à l'extérieur, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$DPUI_{inhalation}$: Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, $mSv.\ Bq^{-1}$

Pour les situations conduisant à retenir les descendants à vie courte du radon, si la mesure est exprimée en énergie alpha potentielle ($J.m^{-3}$), des facteurs de conversion sont publiés dans l'arrêté du 1er septembre 2003.

- **Exposition interne par inhalation à l'extérieur – travaux extérieurs**. Il s'agit de l'incorporation par inhalation des radionucléides ajoutés dans l'atmosphère à l'extérieur par une activité à l'extérieur et générant un empoussièrement à l'extérieur. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{inhalation-extérieur-travaux\ extérieurs}(rn,ca) = A_{sol}(rn).Emp_{extérieur-extérieur}.F_{inhalable}.D_r(ca).BT_{travaux-extérieurs}(ca).DPUI_{inhalation}(rn,ca) \quad \textbf{Eq. 12}$$

$E_{inhalation-extérieur-travaux\ extérieurs}$: Dose efficace par inhalation à l'extérieur pendant l'exécution de travaux extérieurs, $mSv.an^{-1}$
A_{sol} : Activité massique d'un sol extérieur : surface couverte, ou espace vert, ou potager ou berge, $Bq.g^{-1}$
$Emp_{extérieur-extérieur}$: Empoussièrement à l'extérieur pour des travaux extérieurs, $g.m^{-3}$
$F_{inhalable}$: Fraction inhalable des aérosols générés par une activité pratiquée à l'extérieur, -
D_r : Débit respiratoire, $m^3.h^{-1}$
$BT_{travaux-extérieurs}$: Budget temps consacré à des travaux extérieurs, $h.an^{-1}$
$DPUI_{inhalation}$: Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, $mSv.\ Bq^{-1}$

- **Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans l'atmosphère à l'extérieur pendant l'exécution d'activités usuelles d'extérieur, qu'il s'agisse du jardin d'une résidence ou des espaces extérieurs d'un lieu professionnel. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{panache-extérieur-activités\ usuelles}(rn,ca) = A_{air-extérieur}(rn).BT_{extérieur}(ca).N.3600.CD_{panache}(rn) \quad \textbf{Eq. 13}$$

$E_{panache-extérieur-activités\ usuelles}$: Dose efficace par exposition externe à l'air à l'extérieur pendant l'exercice d'activités usuelles, $mSv.an^{-1}$
$A_{air-extérieur}$: Activité volumique de l'air à l'extérieur, $Bq.m^{-3}$
$BT_{extérieur}$: Budget temps passé à l'extérieur, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$CD_{panache}$: Coefficient de dose par exposition externe à l'air, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$

- **Exposition externe à l'air à l'extérieur - travaux extérieurs**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides ajoutés dans l'atmosphère à l'extérieur par une activité à l'extérieur et générant un empoussièrement à l'extérieur. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{panache-extérieur-travaux\ extérieurs}(rn, ca) = A_{sol}(rn).Emp_{extérieur-extérieur}.BT_{travaux-extérieurs}(ca).3600.CD_{panache}(rn) \quad \textbf{Eq. 14}$$

$E_{panache-extérieur-travaux\ extérieurs}$: Dose efficace par exposition externe à l'air à l'extérieur pendant l'exécution de travaux extérieurs, $mSv.an^{-1}$
A_{sol} : Activité massique d'un sol extérieur : surface couverte, ou espace vert, ou potager ou berge, $Bq.g^{-1}$
$Emp_{extérieur-extérieur}$: Empoussièrement à l'extérieur pour des travaux extérieurs, $g.m^{-3}$
$BT_{travaux-extérieurs}$: Budget temps consacré à des travaux extérieurs, $h.an^{-1}$
$CD_{panache}$: Coefficient de dose par exposition externe à l'air, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$

- **Exposition externe au dépôt à l'extérieur - surfaces couvertes**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans les sols extérieurs et recouverts d'une couverture (bitume, béton, gravier, etc.) apportant une protection contre ces rayonnements, pendant que la personne séjourne sur ces surfaces. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{dépôt-extérieur-surfaces\ couvertes}(rn, ca) = A_{sol-surfaces\ couvertes}(rn).\rho_{sol}.10^3.BT_{extérieur-surfaces\ couvertes}(ca).N.3600.CD_{dépôt}(rn).F_p(rn) \quad \textbf{Eq. 15}$$

ou

$$E_{dépôt-extérieur-surfaces\ couvertes}(ca) = DD_{extérieur-surfaces\ couvertes}.10^{-3}.BT_{extérieur-surfaces\ couvertes}(ca).N \quad \textbf{Eq. 16}$$

$E_{dépôt-extérieur-surfaces\ couvertes}$: Dose efficace par exposition externe au dépôt à l'extérieur sur des surfaces couvertes, $mSv.an^{-1}$
$A_{sol-surfaces\ couvertes}$: Activité massique des sols recouverts par des surfaces (bitume, béton, gravier, etc.), $Bq.g^{-1}$
ρ_{sol} : Masse volumique du sol, $kg.m^{-3}$
$BT_{extérieur-surfaces\ couvertes}$: Budget temps passé à l'extérieur sur des surfaces couvertes, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie), $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$
F_p : Facteur d'atténuation apporté au rayonnement d'un radionucléide par la couverture d'une surface, -
$DD_{extérieur-surfaces\ couvertes}$: Débit de dose à l'extérieur sur des surfaces couvertes, $\mu Sv.h^{-1}$

- **Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans les sols extérieurs et non recouverts, pendant que la personne séjourne sur ces espaces verts. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{dépôt-extérieur-espaces\,verts}(rn,ca) = A_{sol-espaces\,verts}(rn).\rho_{sol}.10^{3}.BT_{extérieur-espaces\,verts}(ca).N.3600.CD_{dépôt}(rn) \quad \textbf{Eq. 17}$$

ou

$$E_{dépôt-extérieur-espaces\,verts}(ca) = DD_{extérieur-espaces\,verts}.10^{-3}.BT_{extérieur-espaces\,verts}(ca).N \quad \textbf{Eq. 18}$$

$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}espace\,verts}$: Dose efficace par exposition externe au dépôt à l'extérieur sur des espaces verts, $mSv.an^{-1}$
$A_{sol\text{-}espaces\,verts}$: Activité massique des sols des espaces verts, $Bq.g^{-1}$
ρ_{sol} : Masse volumique du sol, $kg.m^{-3}$
$BT_{extérieur\text{-}espaces\,verts}$: Budget temps passé à l'extérieur sur des espaces verts, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie), $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{3}$
$DD_{extérieur\text{-}espaces\,verts}$: Débit de dose à l'extérieur sur des espaces verts, $\mu Sv.h^{-1}$

- **Exposition externe au dépôt à l'extérieur – potager**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans le sol du potager, pendant que la personne séjourne dans le potager. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{dépôt-extérieur-potager}(rn,ca) = A_{sol-potager}(rn).\rho_{sol}.10^{3}.BT_{extérieur-potager}(ca).N.3600.CD_{dépôt}(rn) \quad \textbf{Eq. 19}$$

ou

$$E_{dépôt-extérieur-potager}(ca) = DD_{extérieur-potager}.10^{-3}.BT_{extérieur-potager}(ca).N \quad \textbf{Eq. 20}$$

$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}potager}$: Dose efficace par exposition externe au dépôt à l'extérieur et sur dans le potager, $mSv.an^{-1}$
$A_{sol\text{-}potager}$: Activité massique du sol dans le potager, $Bq.g^{-1}$
ρ_{sol} : Masse volumique du sol, $kg.m^{-3}$
$BT_{extérieur\text{-}potager}$: Budget temps consacré au potager, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie), $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{3}$
$DD_{extérieur\text{-}potager}$: Débit de dose à l'extérieur dans le potager, $\mu Sv.h^{-1}$

- **Exposition externe au dépôt à l'extérieur - berges**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans le sol des berges d'une mare ou d'un étang, voire d'un plan d'eau, pendant que la personne séjourne sur ces berges. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{dépôt-extérieur-berges}(rn,ca) = A_{sol-berges}(rn).\rho_{berges}.10^{3}.BT_{extérieur-berges}(ca).N.3600.CD_{dépôt}(rn) \quad \textbf{Eq. 21}$$

ou

$$E_{dépôt-extérieur-potager}(ca) = DD_{extérieur-potager}.10^{-3}.BT_{extérieur-berges}(ca).N \quad \textbf{Eq. 22}$$

$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}berges}$: Dose efficace par exposition externe au dépôt à l'extérieur et sur les berges, $mSv.an^{-1}$
$A_{sol\text{-}berges}$: Activité massique dans les sédiments des berges, $Bq.g^{-1}$
ρ_{berges} : Masse volumique des sédiments des berges, $kg.m^{-3}$
$BT_{extérieur\text{-}berge}$: Durée de présence sur les berges, $h.j^{-1}$
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie), $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{3}$
$DD_{extérieur\text{-}berges}$: Débit de dose à l'extérieur sur les berges, $\mu Sv.h^{-1}$

- **Exposition externe à un plan d'eau à l'extérieur**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans l'eau d'un plan d'eau, pendant que la personne séjourne sur ce plan d'eau (pêche, barque ou canoë, pédalo, voile, planche à voile, etc.) . La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{dépôt-extérieur-plan\ d'eau}(rn,ca) = A_{eau-plan\ d'eau}(rn).10^{3}.BT_{extérieur-plan\ d'eau}(ca).3600.CD_{dépôt}(rn) \quad \textbf{Eq. 23}$$

ou

$$E_{dépôt-extérieur-plan\ d'eau}(ca) = DD_{extérieur-plan\ d'eau}.10^{-3}.BT_{extérieur-plan\ d'eau}(ca) \quad \textbf{Eq. 24}$$

$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}plan\ d'eau}$: Dose efficace par exposition externe à l'extérieur et sur un plan d'eau, $mSv.an^{-1}$
$A_{eau\text{-}plan\ d'eau}$: Activité volumique de l'eau d'une mare ou d'un plan d'eau, $Bq.L^{-1}$
$BT_{extérieur\text{-}plan\ d'eau}$: Budget temps consacré à des activités sur un plan d'eau, $h.an^{-1}$
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie), $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{3}$
$DD_{extérieur\text{-}plan\ d'eau}$: Débit de dose à l'extérieur sur un plan d'eau, $\mu Sv.h^{-1}$

- **Exposition externe à l'extérieur - baignade**. Il s'agit de l'exposition aux rayonnements des radionucléides présents dans l'eau d'un plan d'eau, pendant que la personne se baigne — volontairement ou non — dans ce plan d'eau. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{baignade}(rn,ca) = A_{eau-plan\ d'eau}(rn).10^{3}.BT_{extérieur-baignade}(ca).3600.CD_{immersion}(rn) \quad \textbf{Eq. 25}$$

$E_{baignade}$: Dose efficace par baignade, $mSv.an^{-1}$
$A_{eau\text{-}plan\ d'eau}$: Activité volumique de l'eau d'une mare ou d'un plan d'eau, $Bq.L^{-1}$
$BT_{extérieur\text{-}baignade}$: Budget temps consacré à de la baignade, $h.an^{-1}$
$CD_{immersion}$: Coefficient de dose par exposition externe par immersion dans l'eau, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{3}$

- **Exposition interne par ingestion d'eau par inadvertance**. Il s'agit de l'incorporation par ingestion involontaire des radionucléides présents dans l'eau d'un plan d'eau, pendant que la personne se baigne — volontairement ou non — dans ce plan d'eau. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{ingestion-eau\ par\ inadvertance}(rn, ca) = A_{eau-plan\ d'eau}(rn).Q_{eau-baignade}(ca).DPUI_{ingestion}(rn, ca) \quad \textbf{Eq. 26}$$

$E_{ingestion-eau\ par\ inadvertance}$: Dose efficace par ingestion d'eau par inadvertance (activité de baignade), $mSv.an^{-1}$
$A_{eau-plan\ d'eau}$: Activité volumique de l'eau d'une mare ou d'un plan d'eau, $Bq.L^{-1}$
$Q_{eau-baignade}$: Consommation d'eau par inadvertance lors de la baignade, $L.an^{-1}$
$DPUI_{ingestion}$: Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion, $mSv.\ Bq^{-1}$

- **Exposition interne par ingestion d'aliments**. Il s'agit de l'incorporation par ingestion des radionucléides présents dans les aliments produits dans le potager ou dans les aliments d'origine animale élevés sur les lieux considérés, ainsi que dans les poissons pêchés dans l'éventuel plan d'eau. Les aliments produits dans le potager sont supposés ici être uniquement contaminés par transfert racinaire avec le sol contaminé. La contamination par transfert foliaire consécutif à l'irrigation par une eau contaminée ou au dépôt de poussières contaminées n'est pas considérée. Les aliments d'origine animale sont supposés ici être uniquement contaminés consécutivement à l'ingestion d'herbe et de terre provenant du sol. La contamination par abreuvage d'une eau contaminée ou par d'autres végétaux contaminés n'est pas considérée. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{ingestion-aliments}(rn, ca) = \sum_{aliments}\left[A_{aliment}(rn).Q(ca, aliment).TA(ca, aliment)\right].DPUI_{ingestion}(rn, ca) \quad \textbf{Eq. 27}$$

ou

$$E_{ingestion-aliments}(rn, ca) = \left[\begin{array}{l} A_{sol-potager}(rn).\left[\sum_{aliments\,(végétal)} F_{racinaire}(rn, aliment).Q(ca, aliment).TA(ca, aliment)\right] \\ + A_{sol-espaces\ verts}(rn).\left[\sum_{aliments\,(animal)} \left(R_{sol}(animal) + F_{racinaire}(rn, herbe).R_{herbe}\right).F_{animal}(rn).Q(ca, aliment).TA(ca, aliment)\right] \\ + A_{eau-plan\ d'eau}(rn).F_{poisson}(rn, aliment).Q(ca, poisson).TA(ca, poisson) \end{array}\right].10^{3}.DPUI_{ingestion}(rn, ca)$$

Eq. 28

$E_{ingestion-aliments}$: Dose efficace par ingestion d'aliments, $mSv.an^{-1}$
$A_{aliment}$: Activité massique dans un aliment, $Bq.kg^{-1}$
Q : Régime alimentaire, $kg.an^{-1}$
TA : Degré d'autarcie, -
$DPUI_{ingestion}$: Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion, $mSv.\ Bq^{-1}$
$A_{sol-potager}$: Activité massique du sol dans le potager, $Bq.g^{-1}$
$F_{racinaire}$: Facteur de transfert sol-plante, $kg_{sol\ sec}.kg^{-1}_{végétal\ frais}$
$A_{sol-espaces\ verts}$: Activité massique des sols des espaces verts, $Bq.g^{-1}$
R_{sol} : Quantité de sol consommée quotidiennement par l'animal, $kg.j^{-1}$
R_{herbe} : Quantité d'herbe consommée quotidiennement par l'animal, $kg.j^{-1}$
F_{animal} : Facteur de transfert à un aliment d'origine animale, $j.kg^{-1}$ ou $j.L^{-1}$
$A_{eau-plan\ d'eau}$: Activité volumique de l'eau d'une mare ou d'un plan d'eau, $Bq.L^{-1}$
$F_{poisson}$: Facteur de transfert aux parties comestibles des poissons, $m^3.kg^{-1}$

- **Exposition interne par ingestion d'eau de boisson**. Il s'agit de l'incorporation par ingestion des radionucléides présents dans l'eau d'un puits et utilisée pour la boisson. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{ingestion-eau\ de\ puits}(rn, ca) = A_{eau-puits}(rn).Q_{eau\ de\ puits}(ca).DPUI_{ingestion}(rn, ca) \quad \textbf{Eq. 29}$$

$E_{ingestion\text{-}eau\ de\ puits}$: Dose efficace par ingestion d'eau de puits, $mSv.an^{-1}$
$A_{eau\text{-}puits}$: Activité volumique de l'eau consommée d'un puits, $Bq.L^{-1}$
$Q_{eau\ de\ puits}$: Consommation d'eau de boisson d'un puits, $L.an^{-1}$
$DPUI_{ingestion}$: Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion, $mSv.\ Bq^{-1}$

- **Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance**. Il s'agit de l'incorporation par ingestion involontaire des radionucléides présents dans le sol. La dose qui en résulte s'exprime comme suit :

$$E_{ingestion-sol\ par\ inadvertance}(rn, ca) = A_{sol}(rn).Q_{sol}(ca).DPUI_{ingestion}(rn, ca) \quad \textbf{Eq. 30}$$

$E_{ingestion\text{-}sol\ par\ inadvertance}$: Dose efficace par ingestion de sol par inadvertance, $mSv.an^{-1}$
A_{sol} : Activité massique d'un sol extérieur : surface couverte, ou espace vert, ou potager ou berge, $Bq.g^{-1}$
Q_{sol} : Consommation de sol par inadvertance lors, $g.an^{-1}$
$DPUI_{ingestion}$: Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion, $mSv.\ Bq^{-1}$

8- DESCRIPTION DES SCENARIOS GENERIQUES

Les scénarios envisagés correspondent à un nombre limité de configurations possibles de l'exposition de personnes aux rayonnements ionisants lors de l'usage actuel ou futur des milieux et du site, dans la mesure où toutes les configurations ne peuvent être envisagées. Toutefois, les scénarios proposés ci-après ont été construits de manière à envisager un panel assez large d'utilisations possibles des bâtiments et des lieux du site pollué, sans prétendre à l'exhaustivité. Il s'agit donc de scénarios génériques que l'utilisateur peut développer ou modifier à loisir, notamment s'il dispose d'informations précises quant à l'utilisation des bâtiments ou des lieux.

Onze scénarios génériques sont proposés :

- un scénario traite de l'usage des bâtiments et des lieux :
  - Incursion sur friches ;
- un scénario traite de l'usage temporaire des bâtiments et des lieux
  - Chantier ;
- deux scénarios traitent de l'usage défini de bâtiments :
  - Bâtiment (à usage) professionnel ;
  - Bâtiment (à usage) privé ;
- sept scénarios traitent de l'usage défini des lieux :
  - Parking ;
  - Maraîchage ;
  - Activité professionnelle ;
  - Résidence ;

- Etablissement scolaire ;
- Complexe sportif ;
- Base de loisirs.

Chaque scénario est décrit aussi précisément que possible permettant de formuler l'expression de la dose efficace.

8.1 Incursion sur friches

Description : il s'agit de la présence de personnes sur un site abandonné dont l'accès est possible. Le bâtiment est abandonné sans confinement réel, l'extérieur est également abandonné. Un puits et/ou un plan d'eau (mare, étang) sont considérés, mais il n'y a pas de potager (peu compatible avec la notion de site à l'abandon).

Personne(s) exposée(s) : toutes les classes d'âge de chaque sexe peuvent être envisagées a priori.

Activité(s) pratiquée(s) : multiples ; il peut s'agir de promenade, cueillette de champignons, pique-niques, soirées de jeunes, cadre pour jeux de rôles, recherche d'abri provisoire ou non (gens du voyage, éventuels sans-abri), etc.

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'intérieur – sommeil (Eq. 1)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 2)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – sommeil (Eq. 5)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 6))
Exposition externe aux parois à l'intérieur – sommeil (Eq. 9)
Exposition externe aux parois à l'intérieur – hors sommeil (Eq. 10)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11))
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13))
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq.18)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – berges (Eq. 21, Eq.22)
Exposition interne par ingestion d'eau de boisson (Eq. 29)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

8.2 Chantier

Description : il s'agit de travaux de dépollution et de réaménagement d'un site (bâtiment et extérieur) par des professionnels. Le bâtiment n'est pas rasé, et les niveaux de pollution des sols et des structures des bâtiments varient en toute rigueur du début à la fin du chantier. Il n'y a pas de puits ni de potager, ni de plan d'eau.

Personne(s) exposée(s) : adultes et apprentis (adolescents) de chaque sexe peuvent être envisagées a priori.

Activité(s) pratiquée(s) : principalement des activités professionnelles, dont certaines peuvent conduire à des remises en suspension importantes de poussières. En particulier, les budgets temps à considérer devront considérer une part importante d'exercice lourd.

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 2)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux intérieurs (Eq. 3)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 4)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux intérieurs (Eq. 7)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 8)
Exposition externe aux parois à l'intérieur – hors sommeil (Eq. 10)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 12)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 14)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq.18)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

La progression du chantier pouvant conduire à considérer différentes valeurs au cours du temps pour la pollution des sols et des structures, les voies d'exposition devront être découpées en autant de phases qu'il y aura de valeurs différentes.

8.3 Bâtiment (à usage) professionnel

Description : il s'agit d'un ancien bâtiment réaménagé pour une utilisation professionnelle (industrielle ou de service). Le bâtiment dispose, à ses abords, de surfaces couvertes de type parking, d'espaces verts, voire d'un plan d'eau (mare, étang), mais pas de puits ni de potager. Une partie de la pollution des sols est piégée sous les surfaces couvertes.

Personne(s) exposée(s) : adultes et apprentis (adolescents) — ouvriers ou employés de services — de chaque sexe peuvent être envisagées a priori.

Activité(s) pratiquée(s) : activités professionnelles industrielles ou de services. Les activités nautiques sur un éventuel plan d'eau ne sont pas considérées.

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 2)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 6)
Exposition externe aux parois à l'intérieur – hors sommeil (Eq. 10)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq. 18)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – berges (Eq. 21, Eq. 22)

8.4 Bâtiment (à usage) privé

Description : il s'agit d'un ancien bâtiment réaménagé pour une utilisation de type habitat collectif. Le bâtiment dispose, à ses abords, de surfaces couvertes de type parking, d'espaces verts, voire d'un plan d'eau (mare, étang), mais pas de puits ni de potager. Une partie de la pollution des sols est piégée sous les surfaces couvertes.

Personne(s) exposée(s) : toutes les classes d'âge de chaque sexe peuvent être envisagées a priori. En particulier parmi les personnes en âge de travailler — en dehors du bâtiment — des distinctions de budget temps devront être faites.

Activité(s) pratiquée(s) : toutes les activités peuvent être envisagées.

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'intérieur – sommeil (Eq. 1)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 2)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux intérieurs (Eq. 3)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 4)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – sommeil (Eq. 5)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 6)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux intérieurs (Eq. E)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 8)
Exposition externe aux parois à l'intérieur – sommeil (Eq. 9)
Exposition externe aux parois à l'intérieur – hors sommeil (Eq. 10)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 12)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 14)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq. 18)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

8.5 Parking

Description : il s'agit d'un site dont le bâti a été rasé, et dont la surface est destinée au parking de véhicules — privé ou public. Le parking est supposé non gardé. Toute la surface est considérée couverte d'un revêtement, qui piège la pollution au-dessous.

Personne(s) exposée(s) : toutes les classes d'âge de chaque sexe peuvent être envisagées a priori. La présence de personnes sur le parking ne peut être de longue durée, en particulier pour des enfants.

Activité(s) pratiquée(s) : il n'y a pas d'activités particulières autres que la circulation des personnes sur les surfaces couvertes.

Voie(s) d'exposition : Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)

8.6 Maraîchage

Description : il s'agit d'un site dont le bâti a été rasé, et dont toute la surface est réutilisée pour une activité agricole de type maraîchage (ou jardin ouvrier par exemple) — mais sans considérer aucune activité d'élevage. Il n'y a pas de surfaces couvertes. Un puits est considéré, alimenté par une nappe phréatique permettant non seulement l'arrosage des cultures mais aussi la boisson. Les personnes qui exploitent le site sont supposées consommer tout ou partie de la production des cultures réalisées.

Personne(s) exposée(s) : adultes et apprentis (adolescents) — ouvriers agricoles — de chaque sexe peuvent être envisagées a priori.

Activité(s) pratiquée(s) : principalement des activités agricoles, dont certaines peuvent conduire à des remises en suspension importantes de poussières. En particulier, les budgets temps à retenir devront considérer une part importante d'exercice lourd.

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 12)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 14)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – potager (Eq. 19, Eq. 20)
Exposition interne par ingestion d'aliments (Eq. 27, Eq. 28)
Exposition interne par ingestion d'eau de boisson (Eq. 29)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

8.7 Activité professionnelle

Description : le site, dont le bâtiment est neuf, est réaménagé pour une utilisation professionnelle — industrielle ou de services. Le bâtiment dispose, à ses abords, de surfaces couvertes de type parking, d'espaces verts, mais pas de puits, ni de potager ni de plan d'eau (mare, étang). Une partie de la pollution des sols est piégée par les surfaces couvertes.

Etat du site : le sol est supposé suffisamment décontaminé pour permettre une réutilisation par une entreprise. Le bâtiment est neuf.

Personne(s) exposée(s) : adultes et apprentis (adolescents) — ouvriers ou employés de services — de chaque sexe peuvent être envisagées a priori.

Activité(s) pratiquée(s) : activités professionnelles industrielles ou de services.

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 4)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 8)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 12)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 14)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq. 18)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

8.8 Résidence

Description : le site, dont le bâti est neuf, est réaménagé pour une utilisation de type résidence privée de particuliers, qu'il s'agisse de pavillons individuels ou de lotissements. Le bâti dispose, à ses abords, de surfaces couvertes de type allées ou parkings, d'espaces verts, de puits et de potagers, plans d'eau (mare, étang, piscine éventuellement remplie avec de l'eau du puits). Une partie de la pollution des sols est piégée par les surfaces couvertes.

Personne(s) exposée(s) : toutes les classes d'âge de chaque sexe peuvent être envisagées a priori. En particulier parmi les personnes en âge de travailler — en dehors de leur résidence — des distinctions de budget temps devront être faites.

Activité(s) pratiquée(s) : toutes les activités peuvent être envisagées.

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'intérieur – sommeil (Eq. 1)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 2)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux intérieurs (Eq. 3)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 4)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – sommeil (Eq. 5)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 6)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux intérieurs (Eq. 7)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 8)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 12)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 14)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq. 18)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – potager (Eq. 19, Eq. 20)
Exposition externe à un plan d'eau à l'extérieur (Eq. 23, Eq. 24)
Exposition externe à l'extérieur – baignade (Eq. 25)
Exposition interne par ingestion d'eau par inadvertance (Eq. 26)
Exposition interne par ingestion d'aliments (Eq. 27, Eq. 28)
Exposition interne par ingestion d'eau de boisson (Eq. 29)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

8.9 Etablissement scolaire

Description : le site, dont le bâti est neuf, est réaménagé pour une utilisation de type établissement scolaire (crèche, école maternelle, école primaire, collège, lycée, établissement d'enseignement supérieur). Le bâti dispose, à ses abords, de surfaces couvertes de type allées ou parkings, d'espaces verts, mais pas de puits, ni de potagers ni de plan d'eau (mare, étang). Une partie de la pollution des sols est piégée par les surfaces couvertes.

Personne(s) exposée(s) : toutes les classes d'âge de chaque sexe peuvent être envisagées a priori. Des distinctions de budgets temps pourront être faites parmi les personnes qui travaillent dans l'établissement entre les enseignants et les personnels administratifs.

Activité(s) pratiquée(s) : toutes les activités peuvent être envisagées. En particulier, le sommeil est à considérer pour les enfants en bas âge (crèche, école maternelle).

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'intérieur – sommeil (Eq. 1)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 2)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – sommeil (Eq. 5)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 6)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq. 18)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

8.10 Complexe sportif

Description : le site, dont le bâti est neuf, est réaménagé pour une utilisation de type complexe sportif (stade et/ou gymnase, mais non de type piscine). Le bâti dispose, à ses abords, de surfaces couvertes de type allées ou parkings, d'espaces verts, mais pas de puits, ni de potagers ni de plan d'eau (mare, étang). Les terrains de sport sont à classer parmi les espaces verts ou les surfaces couvertes. Une partie de la pollution des sols est piégée par les surfaces couvertes.

Personne(s) exposée(s) : toutes les classes d'âge de chaque sexe peuvent être envisagées a priori, à l'exception toutefois des nourrissons et des enfants de 1 à 2 ans. Des distinctions de budgets temps pourront être faites parmi les adultes entre les entraîneurs

sportifs, les éventuels personnels administratifs, les sportifs professionnels et les sportifs amateurs.

Activité(s) pratiquée(s) : tous les sports peuvent a priori être considérés (à l'exception des activités nautiques au sens large).

Voie(s) d'exposition :

Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 2)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux intérieurs (Eq. 3)
Exposition interne par inhalation à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 4)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 6)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux intérieurs (Eq. 7)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – Travaux extérieurs (Eq. 8)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 12)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – Travaux extérieurs (Eq. 14)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq. 18)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

8.11 Base de loisirs

Description : le site, dont le bâti est neuf, est réaménagé pour une utilisation de type base de loisirs. Le bâti dispose, à ses abords, de surfaces couvertes de type allées ou parkings, d'espaces verts, mais pas de puits, ni de potagers. Un plan d'eau permettant des activités nautiques et de pêche est considéré. Une partie de la pollution des sols est piégée par les surfaces couvertes.

Personne(s) exposée(s) : toutes les classes d'âge de chaque sexe peuvent être envisagées a priori.

Activité(s) pratiquée(s) : tous les activités peuvent a priori être considérés (y compris les activités nautiques au sens large).

Voie(s) d'exposition : Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 2)
Exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles (Eq. 6)
Exposition interne par inhalation à l'extérieur (Eq. 11)
Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles (Eq. 13)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes (Eq. 15, Eq. 16)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts (Eq. 17, Eq. 18)
Exposition externe au dépôt à l'extérieur – berges (Eq. 21, Eq. 22)
Exposition externe à un plan d'eau à l'extérieur (Eq. 23, Eq. 24)
Exposition externe à l'extérieur – baignade (Eq. 25)
Exposition interne par ingestion d'eau par inadvertance (Eq. 26)
Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance (Eq. 30)

9- GLOSSAIRE

Tableau II : Grandeurs et paramètres

Nom	Variable(s)	Définition	Unité
$A_{air\text{-}extérieur}$	rn	Activité volumique de l'air à l'extérieur	$Bq.m^{-3}$
$A_{air\text{-}intérieur}$	rn	Activité volumique de l'air dans les bâtiments	$Bq.m^{-3}$
$A_{aliment}$	rn	Activité massique dans un aliment	$Bq.kg^{-1}$
$A_{eau\text{-}plan\ d'eau}$	rn	Activité volumique de l'eau d'une mare ou d'un plan d'eau	$Bq.L^{-1}$
$A_{eau\text{-}puits}$	rn	Activité volumique de l'eau consommée d'un puits	$Bq.L^{-1}$
A_{sol}	rn	Activité massique d'un sol extérieur : surface couverte, ou espace vert, ou potager ou berge	$Bq.g^{-1}$
$A_{sol\text{-}berges}$	-	Activité massique dans les sédiments des berges	$Bq.g^{-1}$
$A_{sol\text{-}espaces\ verts}$	-	Activité massique des sols des espaces verts	$Bq.g^{-1}$
$A_{sol\text{-}potager}$	-	Activité massique du sol dans le potager	$Bq.g^{-1}$
$A_{sol\text{-}surfaces\ couvertes}$	-	Activité massique des sols recouverts par des surfaces (bitume, béton, gravier, etc.)	$Bq.g^{-1}$
$A_{structures}$	rn	Activité massique dans les structures des bâtiments (sol, murs et plafonds)	$Bq.g^{-1}$
$BT_{extérieur}$	ca	Budget temps passé à l'extérieur	$h.j^{-1}$
$BT_{extérieur\text{-}baignade}$	ca	Budget temps consacré à de la baignade	$h.an^{-1}$
$BT_{extérieur\text{-}berge}$	ca	Durée annuelle de présence sur les berges	$h.j^{-1}$
$BT_{extérieur\text{-}espaces\ verts}$	ca	Budget temps passé à l'extérieur sur des espaces verts	$h.j^{-1}$
$BT_{extérieur\text{-}plan\ d'eau}$	ca	Budget temps consacré à des activités sur un plan d'eau	$h.an^{-1}$
$BT_{extérieur\text{-}potager}$	ca	Budget temps consacré au potager	$h.j^{-1}$
$BT_{extérieur\text{-}surfaces\ couvertes}$	ca	Budget temps passé à l'extérieur sur des surfaces couvertes	$h.j^{-1}$
$BT_{intérieur\text{-}hors\ sommeil}$	ca	Budget temps passé à l'intérieur hors sommeil	$h.j^{-1}$
$BT_{sommeil}$	ca	Budget temps consacré au sommeil	$h.j^{-1}$
$BT_{travaux\text{-}extérieurs}$	ca	Budget temps consacré à des activités à l'extérieur pouvant mettre des aérosols en suspension (jardinage, maraîchage, etc.)	$h.an^{-1}$
$BT_{travaux\text{-}intérieurs}$	ca	Budget temps consacré à des activités à l'intérieur pouvant mettre des aérosols en suspension (réfection d'un mur par exemple)	$h.an^{-1}$
$CD_{dépôt}$	rn	Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie)	$mSv.m^{3}.Bq^{-1}s^{-1}$
$CD_{immersion}$	rn	Coefficient de dose par exposition externe par immersion dans l'eau	$mSv.m^{3}.Bq^{-1}s^{-1}$
$CD_{panache}$	rn	Coefficient de dose par exposition externe à l'air	$mSv.m^{3}.s^{-1}.Bq^{-1}$
$DD_{extérieur\text{-}berges}$	-	Débit de dose à l'extérieur sur les berges	$\mu Sv.h^{-1}$
$DD_{extérieur\text{-}espaces\ verts}$	-	Débit de dose à l'extérieur sur des espaces verts	$\mu Sv.h^{-1}$
$DD_{extérieur\text{-}plan\ d'eau}$	-	Débit de dose à l'extérieur sur un plan d'eau	$\mu Sv.h^{-1}$
$DD_{extérieur\text{-}potager}$	-	Débit de dose à l'extérieur dans le potager	$\mu Sv.h^{-1}$
$DD_{extérieur\text{-}surfaces\ couvertes}$	-	Débit de dose à l'extérieur sur des surfaces couvertes	$\mu Sv.h^{-1}$
$DD_{intérieur}$	-	Débit de dose à l'intérieur des bâtiments	$\mu Sv.h^{-1}$
$DPUI_{ingestion}$	rn, ca	Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion	$mSv.\ Bq^{-1}$

3034 # Tableau II (suite) : Grandeurs et paramètres

Nom	Variable(s)	Définition	Unité
$DPUI_{inhalation}$	rn, ca	Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation	mSv. Bq^{-1}
D_r	ca, activité	Débit respiratoire	$m^3.h^{-1}$
$E_{baignade}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par baignade	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt - berge}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par présence sur les berges	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt - sol}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par présence sur les sols	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt-extérieur-berges}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe au dépôt à l'extérieur et sur les berges	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt-extérieur-espace verts}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe au dépôt à l'extérieur et sur des espaces verts	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt-extérieur-plan d'eau}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe à l'extérieur et sur un plan d'eau	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt-extérieur-potager}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe au dépôt à l'extérieur et sur dans le potager	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt-extérieur-surfaces couvertes}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe au dépôt à l'extérieur et sur des surfaces couvertes	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt-intérieur-hors sommeil}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe aux parois hors sommeil	$mSv.an^{-1}$
$E_{dépôt-intérieur-sommeil}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe aux parois pendant le sommeil	$mSv.an^{-1}$
$E_{ingestion-aliments}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par ingestion d'aliments (légumes feuilles, légumes fruits, légumes racines, pommes de terre, poisson)	$mSv.an^{-1}$
$E_{ingestion-eau de puits}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par ingestion d'eau de puits	$mSv.an^{-1}$
$E_{ingestion-eau par inadvertance}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par ingestion d'eau par inadvertance (activité de baignade)	$mSv.an^{-1}$
$E_{ingestion-sol par inadvertance}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par ingestion de sol par inadvertance	$mSv.an^{-1}$
$E_{inhalation-extérieur}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par inhalation à l'extérieur	$mSv.an^{-1}$
$E_{inhalation-extérieur-travaux extérieurs}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par inhalation à l'extérieur pendant l'exécution de travaux extérieurs	$mSv.an^{-1}$
$E_{inhalation-intérieur-activités usuelles}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par inhalation à l'intérieur pendant l'exercice d'activités usuelles	$mSv.an^{-1}$
$E_{inhalation-intérieur-sommeil}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par inhalation pendant le sommeil	$mSv.an^{-1}$
$E_{inhalation-intérieur-travaux extérieurs}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par inhalation à l'intérieur pendant l'exécution de travaux extérieurs	$mSv.an^{-1}$
$E_{inhalation-intérieur-travaux intérieurs}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par inhalation à l'intérieur pendant l'exécution de travaux intérieurs	$mSv.an^{-1}$
$Emp_{extérieur-extérieur}$	-	Empoussièrement à l'extérieur pour une activité pratiquée à l'extérieur	$g.m^{-3}$
$Emp_{intérieur-extérieur}$	-	Empoussièrement à l'intérieur pour une activité pratiquée à l'extérieur	$g.m^{-3}$
$Emp_{intérieur-intérieur}$	-	Empoussièrement à l'intérieur pour une activité pratiquée à l'intérieur	$g.m^{-3}$
$E_{panache-extérieur-activités usuellesl}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe à l'air à l'extérieur pendant l'exercice d'activités usuelles	$mSv.an^{-1}$
$E_{panache-extérieur-travaux extérieurs}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe à l'air à l'extérieur pendant l'exécution de travaux extérieurs	$mSv.an^{-1}$
$E_{panache-intérieur-activités usuellesl}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe à l'air à l'intérieur pendant l'exercice d'activités usuelles	$mSv.an^{-1}$
$E_{panache-intérieur-sommeil}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe à l'air pendant le sommeil	$mSv.an^{-1}$

3035 # Tableau II (suite) : Grandeurs et paramètres

Nom	Variable(s)	Définition	Unité
$E_{panache\text{-}intérieur\text{-}travaux\ extérieurs}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe à l'air à l'intérieur pendant l'exécution de travaux extérieurs	$mSv.an^{-1}$
$E_{panache\text{-}intérieur\text{-}travaux\ intérieurs}$	rn, ca	Dose efficace annuelle par exposition externe à l'air à l'intérieur pendant l'exécution de travaux intérieurs	$mSv.an^{-1}$
$F_{inhalable}$	-	Fraction inhalable des aérosols	-
F_p	rn	Facteur d'atténuation apporté au rayonnement d'un radionucléide par la couverture d'une surface	-
$F_{poisson}$	rn	Facteur de transfert aux parties comestibles des poissons	$m^3.kg^{-1}$
$F_{racinaire}$	rn, aliment	Facteur de transfert sol-plante pour les aliments d'origine végétale (légumes feuilles, légumes fruits, légumes racines, pommes de terre) et pour l'herbe	$kg_{sol\ sec}.kg^{-1}_{végétal\ frais}$
F_{animal}	rn, aliment	Facteur de transfert à un aliment d'origine animale	$j.kg^{-1}$ ou $j.L^{-1}$
λ	rn	Constante de décroissance radioactive	s^{-1}
N	-	Nombre de jours par considérés pour un scénario	$j.an^{-1}$
Q	ca, aliment	Régime alimentaire	$kg.an^{-1}$
$Q_{eau\ de\ puits}$	ca	Consommation d'eau de boisson d'un puits	$L.an^{-1}$
$Q_{eau\text{-}baignade}$	ca	Consommation d'eau par inadvertance lors de la baignade	$L.an^{-1}$
Q_{sol}	ca	Consommation de sol par inadvertance	$kg.an^{-1}$
R_{herbe}	animal	Quantité d'herbe ingérée quotidiennement par l'animal	$kg.j^{-1}$
R_{sol}	Animal	Quantité de sol ingéré quotidiennement par l'animal	$kg.j^{-1}$
T	rn	Période radioactive	s
TA	ca, aliment	Degré d'autarcie	-
ρ_{berges}	-	Masse volumique des sédiments des berges	$kg.m^{-3}$
ρ_{sol}	-	Masse volumique du sol	$kg.m^{-3}$

10- QUELQUES VALEURS POUR QUELQUES PARAMETRES

On donne ci-après des exemples de valeurs issues de la littérature pour les principaux paramètres permettant l'estimation des doses.

10.1 Budget temps

Les tableaux III et IV présentent les budgets temps de la publication 66 de la CIPR [7] en fonction de la classe d'âge et en fonction du type d'activité de l'individu. Lorsqu'il n'y a qu'une valeur, celle-ci s'applique à l'ensemble des individus de la classe d'âge ; lorsqu'il y a deux valeurs, la première s'applique aux individus de sexe masculin et la seconde aux individus de sexe féminin.

Tableau III : Budget temps des enfants ($h.j^{-1}$)

Lieu	Type d'activité	Nourrisson	1 - 2 ans	3 - 5 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans
Intérieur habitat	Sommeil	17	14	12	10	10
	Activités usuelles	7	5 [a]	6 [a]	8 [a]	7 [c] / 9 [c]
Intérieur autre	Divers	-	4 [a]	3 [a]	3 [a]	4 [c] / 3 [c]
Extérieur	Divers	-	1 [a]	3 [a]	3 [a]	3 [d] / 2 [b]

a : durée à distribuer selon 1/3 de repos et 2/3 d'exercice léger
b : durée à distribuer selon 1/2 de repos, 3/8 d'exercice léger et 1/8 d'exercice lourd
c : durée à distribuer selon 1/2 de repos et 1/2 d'exercice léger
d : durée à distribuer selon 2/3 d'exercice léger et 1/3 d'exercice lourd

Tableau IV : Budget temps des adultes ($h.j^{-1}$)

Lieu	Type d'activité	Au foyer	Travailleur	
		Adulte	sédentaire	extérieur
Intérieur habitat	Sommeil	8,5	8,5	8,5
	Activités usuelles	- / 13,5 [a]	7 [a] / 9,5 [a]	7 [a]
Intérieur autre	Divers	- / 1 [a]	6,5 [a] / 4 [a]	1 [a]
Extérieur	Exercice lourd	- / -	- / -	6 [b]
	Divers	- / 1 [c]	2 [c]	1,5 [c]

a : durée à distribuer selon 1/3 de repos et 2/3 d'exercice léger
b : durée à distribuer selon 7/8 d'exercice léger et 1/8 d'exercice lourd
c : durée à distribuer selon 1/2 de repos, 3/8 d'exercice léger et 1/8 d'exercice lourd

10.2 Débit respiratoire

Le tableau V présente les débits respiratoires de la publication 66 de la CIPR [7] en fonction de la classe d'âge et en fonction du type d'activité de l'individu. Lorsqu'il n'y a qu'une valeur, celle-ci s'applique à l'ensemble des individus de la classe d'âge ; lorsqu'il y a deux valeurs, la première s'applique aux individus de sexe masculin et la seconde aux individus de sexe féminin.

Tableau V : Débit respiratoire ($m^3.h^{-1}$)

Classe d'âge	Type d'activité			
	Sommeil	Repos	Exercice léger	Exercice lourd
Nourrisson (< 1 an)	0,09	-	-	-
Enfant de 1 – 2 ans	0,15	0,22	0,35	-
Enfant de 3 – 7 ans	0,24	0,32	0,57	-
Enfant de 8 – 12 ans	0,31	0,38	1,12	2,22 / 1,84
Adolescent de 13 – 17 ans	0,42 / 0,35	0,48 / 0,40	1,38 / 1,30	2,92 / 2,57
Adulte (≥ 18 ans)	0,45 / 0,32	0,54 / 0,39	1,50 / 1,25	3,0 / 2,7

10.3 Facteur d'atténuation des rayonnements

Le tableau VI présente des valeurs de facteur de protection aux rayonnements γ de différentes couvertures de surface aux rayonnements des radionucléides piégés au-dessous. Les résultats sont présentés par nature et épaisseur de type de couverture de surface, et par radionucléide. Les radionucléides et la filiation radioactive considérés sont ceux du tableau I (les rapports de branchement utilisés pour les filiations radioactives sont issues de la publication 38 de la CIPR [1]) ; les radionucléides concernés apparaissent avec un signe + dans le tableau VI. Les radionucléides ^{3}H, ^{14}C et ^{63}Ni ne sont pas concernés dans la mesure où il s'agit d'émetteurs bêta purs, pour lesquelles la mise en place de toute couverture de surface de quelques cm suffit à arrêter tous les rayonnements.

Les facteurs de protection sont calculés avec le code MicroShield [8], en considérant une pollution homogène sur une épaisseur de 10 m d'un sol (supposé infini dans ses dimensions horizontales) ayant une masse volumique de 1700 $kg.m^{-3}$ (sol standard composé —en volume — de 20 % d'air, 20 % d'eau et 60 % de matières solides (densité 2500) — d'après Technical Guidance Document on Risk Assessment, Institute for Health and Consumer Protection, European Chemicals Bureau, Part II, EUR 20418 EN/2). Le code MicroShield ne décrivant pas les compositions d'une part, et ne traitant pas du cas du sol explicitement, celui-ci a été assimilé à de l'eau ; de même pour le bitume (dont la densité a été postulée égale à 1 — ce qui est certainement pénalisant) et la terre (dont la densité est supposée égale à celle du sol qu'elle recouvre). Les facteurs de protection sont calculés pour un point de calcul situé à 1 m au dessus de la surface du sol, et sont donc adaptés à des calculs simulant une occupation humaine au voisinage du sol.

3081 **Tableau VI : Facteur de protection**

Nature	Epaisseur (cm)	Facteur de protection						
		Mn-54	Co-57	Co-60	Sr-90+	I-129	Cs-137+	Pb-210+
Terre (densité 1,7)	5	$2{,}51.10^{-1}$	$2{,}94.10^{-1}$	$4{,}86.10^{-1}$	$1{,}05.10^{-5}$	$5{,}01.10^{-2}$	$4{,}33.10^{-1}$	$1{,}38.10^{-1}$
	10	$9{,}26.10^{-2}$	$9{,}06.10^{-2}$	$2{,}69.10^{-1}$	$1{,}08.10^{-9}$	$4{,}04.10^{-3}$	$2{,}08.10^{-1}$	$2{,}19.10^{-2}$
	20	$1{,}61.10^{-2}$	$8{,}84.10^{-3}$	$8{,}83.10^{-2}$	$2{,}38.10^{-17}$	$4{,}19.10^{-5}$	$5{,}03.10^{-2}$	$5{,}68.10^{-4}$
	30	$3{,}23.10^{-3}$	$8{,}97.10^{-4}$	$3{,}00.10^{-2}$	$7{,}95.10^{-25}$	$5{,}58.10^{-7}$	$1{,}24.10^{-2}$	$1{,}49.10^{-5}$
	40	$6{,}91.10^{-4}$	$9{,}82.10^{-5}$	$1{,}03.10^{-2}$		$8{,}02.10^{-9}$	$3{,}10.10^{-3}$	$3{,}90.10^{-7}$
	50	$1{,}54.10^{-4}$	$1{,}25.10^{-5}$	$3{,}60.10^{-3}$		$1{,}19.10^{-10}$	$7{,}75.10^{-4}$	$1{,}03.10^{-8}$
Bitume (densité 1)	2	$6{,}42.10^{-1}$	$7{,}37.10^{-1}$	$8{,}10.10^{-1}$	$3{,}30.10^{-2}$	$4{,}34.10^{-1}$	$7{,}93.10^{-1}$	$5{,}89.10^{-1}$
	5	$4{,}01.10^{-1}$	$4{,}80.10^{-1}$	$6{,}32.10^{-1}$	$6{,}31.10^{-4}$	$1{,}54.10^{-1}$	$5{,}94.10^{-1}$	$2{,}99.10^{-1}$
	10	$2{,}08.10^{-1}$	$2{,}39.10^{-1}$	$4{,}36.10^{-1}$	$1{,}99.10^{-6}$	$3{,}16.10^{-2}$	$3{,}79.10^{-1}$	$9{,}98.10^{-2}$
Béton (densité 2,3)	5	$1{,}99.10^{-1}$	$2{,}05.10^{-1}$	$4{,}25.10^{-1}$	$3{,}09.10^{-27}$	$2{,}32.10^{-4}$	$3{,}67.10^{-1}$	$8{,}60.10^{-3}$
	10	$6{,}19.10^{-2}$	$4{,}46.10^{-2}$	$2{,}09.10^{-1}$		$3{,}17.10^{-7}$	$1{,}52.10^{-1}$	$8{,}73.10^{-5}$
	15	$2{,}15.10^{-2}$	$9{,}85.10^{-3}$	$1{,}06.10^{-1}$		$4{,}61.10^{-10}$	$6{,}38.10^{-2}$	$8{,}67.10^{-7}$

3082

3083 **Tableau VI (suite) : Facteur de protection**

Nature	Epaisseur (cm)	Facteur de protection						
		Ra-226+	Ra-228	Ac-227+	Th-228+	U-235+	U-238+	Pu-241+
Terre (densité 1,7)	5	$4{,}55.10^{-1}$	$4{,}48.10^{-1}$	$3{,}50.10^{-1}$	$4{,}82.10^{-1}$	$3{,}20.10^{-1}$	$3{,}36.10^{-1}$	$2{,}84.10^{-1}$
	10	$2{,}38.10^{-1}$	$2{,}29.10^{-1}$	$1{,}35.10^{-1}$	$2{,}74.10^{-1}$	$1{,}09.10^{-1}$	$1{,}37.10^{-1}$	$8{,}66.10^{-2}$
	20	$7{,}39.10^{-2}$	$6{,}57.10^{-2}$	$2{,}25.10^{-2}$	$1{,}06.10^{-1}$	$1{,}31.10^{-2}$	$3{,}14.10^{-2}$	$8{,}65.10^{-3}$
	30	$2{,}55.10^{-2}$	$2{,}02.10^{-2}$	$4{,}11.10^{-3}$	$4{,}61.10^{-2}$	$1{,}61.10^{-3}$	$9{,}06.10^{-3}$	$9{,}32.10^{-4}$
	40	$9{,}40.10^{-3}$	$6{,}43.10^{-3}$	$8{,}10.10^{-4}$	$2{,}15.10^{-2}$	$2{,}03.10^{-4}$	$2{,}87.10^{-3}$	$1{,}08.10^{-4}$
	50	$3{,}63.10^{-3}$	$2{,}11.10^{-3}$	$1{,}71.10^{-4}$	$1{,}03.10^{-2}$	$2{,}58.10^{-5}$	$9{,}51.10^{-4}$	$1{,}32.10^{-5}$
Bitume (densité 1)	2	$8{,}00.10^{-1}$	$7{,}97.10^{-1}$	$7{,}61.10^{-1}$	$8{,}10.10^{-1}$	$7{,}49.10^{-1}$	$7{,}46.10^{-1}$	$7{,}27.10^{-1}$
	5	$6{,}09.10^{-1}$	$6{,}04.10^{-1}$	$5{,}27.10^{-1}$	$6{,}28.10^{-1}$	$5{,}03.10^{-1}$	$5{,}08.10^{-1}$	$4{,}68.10^{-1}$
	10	$4{,}04.10^{-1}$	$3{,}96.10^{-1}$	$2{,}95.10^{-1}$	$4{,}33.10^{-1}$	$2{,}64.10^{-1}$	$2{,}84.10^{-1}$	$2{,}30.10^{-1}$
Béton (densité 2,3)	5	$3{,}90.10^{-1}$	$3{,}83.10^{-1}$	$2{,}70.10^{-1}$	$4{,}16.10^{-1}$	$2{,}39.10^{-1}$	$2{,}43.10^{-1}$	$1{,}87.10^{-1}$
	10	$1{,}80.10^{-1}$	$1{,}72.10^{-1}$	$8{,}57.10^{-2}$	$2{,}14.10^{-1}$	$6{,}25.10^{-2}$	$8{,}67.10^{-2}$	$4{,}05.10^{-2}$
	15	$8{,}87.10^{-2}$	$8{,}05.10^{-2}$	$2{,}89.10^{-2}$	$1{,}19.10^{-1}$	$1{,}67.10^{-2}$	$3{,}70.10^{-2}$	$9{,}45.10^{-3}$

3084 **Tableau VI (suite) : Facteur de protection**

Nature	Epaisseur (cm)	Facteur de protection						
		K-40	Po-210	Th-230	Th-232	U-234	U-236	Pu-238
Terre (densité 1,7)	5	$3{,}38.10^{-1}$	$4{,}48.10^{-1}$	$2{,}33.10^{-1}$	$2{,}14.10^{-1}$	$1{,}73.10^{-1}$	$1{,}45.10^{-1}$	$7{,}61.10^{-2}$
	10	$1{,}55.10^{-1}$	$2{,}25.10^{-1}$	$6{,}55.10^{-2}$	$5{,}55.10^{-2}$	$4{,}37.10^{-2}$	$3{,}71.10^{-2}$	$2{,}05.10^{-2}$
	20	$3{,}95.10^{-2}$	$5{,}99.10^{-2}$	$6{,}33.10^{-3}$	$4{,}19.10^{-3}$	$3{,}16.10^{-3}$	$2{,}80.10^{-3}$	$1{,}90.10^{-3}$
	30	$1{,}13.10^{-2}$	$1{,}64.10^{-2}$	$7{,}37.10^{-4}$	$3{,}51.10^{-4}$	$2{,}55.10^{-4}$	$2{,}35.10^{-4}$	$2{,}27.10^{-4}$
	40	$3{,}44.10^{-3}$	$4{,}51.10^{-3}$	$9{,}60.10^{-5}$	$3{,}15.10^{-5}$	$2{,}28.10^{-5}$	$2{,}05.10^{-5}$	$3{,}74.10^{-5}$
	50	$1{,}08.10^{-3}$	$1{,}25.10^{-3}$	$1{,}34.10^{-5}$	$2{,}94.10^{-6}$	$2{,}41.10^{-6}$	$1{,}82.10^{-6}$	$8{,}17.10^{-6}$
Bitume (densité 1)	2	$7{,}08.10^{-1}$	$7{,}98.10^{-1}$	$6{,}57.10^{-1}$	$6{,}30.10^{-1}$	$5{,}36.10^{-1}$	$4{,}57.10^{-1}$	$2{,}66.10^{-1}$
	5	$4{,}88.10^{-1}$	$6{,}04.10^{-1}$	$4{,}02.10^{-1}$	$3{,}79.10^{-1}$	$3{,}11.10^{-1}$	$2{,}62.10^{-1}$	$1{,}38.10^{-1}$
	10	$2{,}91.10^{-1}$	$3{,}96.10^{-1}$	$1{,}85.10^{-1}$	$1{,}68.10^{-1}$	$1{,}35.10^{-1}$	$1{,}14.10^{-1}$	$5{,}98.10^{-2}$
Béton (densité 2,3)	5	$2{,}81.10^{-1}$	$3{,}84.10^{-1}$	$1{,}20.10^{-1}$	$1{,}02.10^{-1}$	$8{,}17.10^{-2}$	$6{,}96.10^{-2}$	$4{,}16.10^{-2}$
	10	$1{,}13.10^{-1}$	$1{,}67.10^{-1}$	$2{,}60.10^{-2}$	$1{,}77.10^{-2}$	$1{,}37.10^{-2}$	$1{,}28.10^{-2}$	$8{,}40.10^{-3}$
	15	$4{,}93.10^{-2}$	$7{,}48.10^{-2}$	$6{,}78.10^{-3}$	$3{,}58.10^{-3}$	$2{,}47.10^{-3}$	$2{,}52.10^{-3}$	$1{,}87.10^{-3}$

3085 **Tableau VI (suite) : Facteur de protection**

Nature	Epaisseur (cm)	Facteur de protection			
		Pu-239	Pu-240	Am-241	Cf-252
Terre (densité 1,7)	5	$6{,}41.10^{-2}$	$9{,}04.10^{-2}$	$1{,}94.10^{-1}$	$8{,}40.10^{-2}$
	10	$2{,}23.10^{-2}$	$2{,}11.10^{-2}$	$4{,}13.10^{-2}$	$2{,}36.10^{-2}$
	20	$3{,}18.10^{-3}$	$1{,}42.10^{-3}$	$1{,}92.10^{-3}$	$2{,}04.10^{-3}$
	30	$5{,}15.10^{-4}$	$1{,}17.10^{-4}$	$9{,}17.10^{-5}$	$1{,}85.10^{-4}$
	40	$8{,}97.10^{-5}$	$1{,}19.10^{-5}$	$4{,}80.10^{-6}$	$1{,}72.10^{-5}$
	50	$1{,}64.10^{-5}$	$1{,}53.10^{-6}$	$3{,}38.10^{-7}$	$1{,}65.10^{-6}$
Bitume (densité 1)	2	$1{,}68.10^{-1}$	$3{,}25.10^{-1}$	$6{,}54.10^{-1}$	$3{,}12.10^{-1}$
	5	$1{,}02.10^{-1}$	$1{,}70.10^{-1}$	$3{,}70.10^{-1}$	$1{,}51.10^{-1}$
	10	$5{,}29.10^{-2}$	$6{,}95.10^{-2}$	$1{,}47.10^{-1}$	$6{,}67.10^{-2}$
Béton (densité 2,3)	5	$4{,}49.10^{-2}$	$3{,}42.10^{-2}$	$4{,}98.10^{-2}$	$5{,}06.10^{-2}$
	10	$1{,}28.10^{-2}$	$5{,}65.10^{-3}$	$2{,}86.10^{-3}$	$9{,}83.10^{-3}$
	15	$3{,}97.10^{-3}$	$1{,}09.10^{-3}$	$1{,}89.10^{-4}$	$1{,}98.10^{-3}$

3086

10.4 DPUI par inhalation et ingestion (Arrêté du 1er septembre 2003)

Les tableaux VII-a et VII-b présentent les valeurs de dose par unité d'incorporation proposées dans l'arrêté du 1er septembre 2003 respectivement pour l'inhalation et l'ingestion.

Tableau VII-a : DPUI par inhalation (source : arrêté du 1er septembre 2003)

			DPUI Inhalation (Arrêté du 1er septembre 2003)					
RN	Forme	Observation	Nourrisson Sv.Bq-1	1 - 2 ans Sv.Bq-1	3 - 7 ans Sv.Bq-1	8 - 12 ans Sv.Bq-1	13 - 17 ans Sv.Bq-1	Adulte Sv.Bq-1
H-3	HTO		6,40E-11	4,80E-11	3,10E-11	2,30E-11	1,80E-11	1,80E-11
H-3	HT		6,40E-15	4,80E-15	3,10E-15	2,30E-15	1,80E-15	1,80E-15
H-3	CH3T		6,40E-13	4,80E-13	3,10E-13	2,30E-13	1,80E-13	1,80E-13
H-3	Aérosol		3,40E-10	2,70E-10	1,40E-10	8,20E-11	5,30E-11	4,50E-11
C-14	CH4		6,60E-12	7,80E-12	4,90E-12	4,00E-12	2,90E-12	2,90E-12
C-14	CO2		1,90E-11	1,90E-11	1,10E-11	8,90E-12	6,30E-12	6,20E-12
C-14	CO		9,10E-12	5,70E-12	2,80E-12	1,70E-12	9,90E-13	8,00E-13
C-14	Aérosol		8,30E-09	6,60E-09	4,00E-09	2,80E-09	2,50E-09	2,00E-09
Sr-90	M	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	1,50E-07	1,10E-07	6,50E-08	5,10E-08	5,00E-08	3,60E-08
Y-90	M	Composés non spécifiés (Arrêté 01/09/2003 Tableau 3.3)	1,30E-08	8,40E-09	4,00E-09	2,60E-09	1,70E-09	1,40E-09
Sr-90+			1,63E-07	1,18E-07	6,90E-08	5,36E-08	5,17E-08	3,74E-08
Cs-137	F	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	8,80E-09	5,40E-09	3,60E-09	3,70E-09	4,40E-09	4,60E-09
Cs-137+			8,80E-09	5,40E-09	3,60E-09	3,70E-09	4,40E-09	4,60E-09
Ra-226	M	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	1,50E-05	1,10E-05	7,00E-06	4,90E-06	4,50E-06	3,50E-06
Pb-214	M	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	6,40E-08	4,60E-08	2,60E-08	1,90E-08	1,40E-08	1,40E-08
Bi-214	M	Composés non spécifiés (Arrêté 01/09/2003 Tableau 3.3)	8,70E-08	6,10E-08	3,10E-08	2,20E-08	1,70E-08	1,40E-08
Pb-210	M	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	5,00E-06	3,70E-06	2,20E-06	1,50E-06	1,30E-06	1,10E-06
Bi-210	M	Composés non spécifiés (Arrêté 01/09/2003 Tableau 3.3)	3,90E-07	3,00E-07	1,90E-07	1,30E-07	1,10E-07	9,30E-08
Po-210	M	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	1,50E-05	1,10E-05	6,70E-06	4,60E-06	4,00E-06	3,30E-06
Ra-226+			3,55E-05	2,61E-05	1,61E-05	1,12E-05	9,94E-06	8,02E-06
Th-232	S	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	5,40E-05	5,00E-05	3,70E-05	2,60E-05	2,50E-05	2,50E-05
Ra-228	M	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	1,50E-05	1,00E-05	6,30E-06	4,60E-06	4,40E-06	2,60E-06
Ac-228	F	Composés non spécifiés (Arrêté 01/09/2003 Tableau 3.3)	1,80E-07	1,60E-07	9,70E-08	5,70E-08	2,90E-08	2,50E-08
Th-228	S	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	1,60E-04	1,30E-04	8,20E-05	5,50E-05	4,70E-05	4,00E-05
Ra-224	M	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	1,10E-05	8,20E-06	5,30E-06	3,90E-06	3,70E-06	3,00E-06
Pb-212	M	Recommandation (Arrêté 01/09/2003 Tableau 1.3)	6,20E-07	4,60E-07	3,00E-07	2,20E-07	2,20E-07	1,70E-07
Bi-212	M	Composés non spécifiés (Arrêté 01/09/2003 Tableau 3.3)	1,60E-07	1,10E-07	6,00E-08	4,40E-08	3,80E-08	3,10E-08
Th-232+			2,41E-04	1,99E-04	1,31E-04	8,98E-05	8,04E-05	7,08E-05
Am-241	M		7,30E-05	6,90E-05	5,10E-05	4,00E-05	4,00E-05	4,20E-05

3092 **Tableau VII-b : DPUI par ingestion (source : arrêté du 1er septembre 2003)**

	DPUI Ingestion (Arrêté du 1er septembre 2003)					
RN	Nourrisson Sv.Bq-1	1 - 2 ans Sv.Bq-1	3 - 7 ans Sv.Bq-1	8 - 12 ans Sv.Bq-1	13 - 17 ans Sv.Bq-1	Adulte Sv.Bq-1
H-3	6,40E-11	4,80E-11	3,10E-11	2,30E-11	1,80E-11	1,80E-11
C-14	1,40E-09	1,60E-09	9,90E-10	8,00E-10	5,70E-10	5,80E-10
Sr-90	2,30E-07	7,30E-08	4,70E-08	6,00E-08	8,00E-08	2,80E-08
Y-90	3,10E-08	2,00E-08	1,00E-08	5,90E-09	3,30E-09	2,70E-09
Sr-90+	2,61E-07	9,30E-08	5,70E-08	6,59E-08	8,33E-08	3,07E-08
Cs-137	2,10E-08	1,20E-08	9,60E-09	1,00E-08	1,30E-08	1,30E-08
Cs-137+	2,10E-08	1,20E-08	9,60E-09	1,00E-08	1,30E-08	1,30E-08
Ra-226	4,70E-06	9,60E-07	6,20E-07	8,00E-07	1,50E-06	2,80E-07
Pb-214	2,70E-09	1,00E-09	5,20E-10	3,10E-10	2,00E-10	1,40E-10
Bi-214	1,40E-09	7,40E-10	3,60E-10	2,10E-10	1,40E-10	1,10E-10
Pb-210	8,40E-06	3,60E-06	2,20E-06	1,90E-06	1,90E-06	6,90E-07
Bi-210	1,50E-08	9,70E-09	4,80E-09	2,90E-09	1,60E-09	1,30E-09
Po-210	2,60E-05	8,80E-06	4,40E-06	2,60E-06	1,60E-06	1,20E-06
Ra-226+	3,91E-05	1,34E-05	7,23E-06	5,30E-06	5,00E-06	2,17E-06
Th-232	4,60E-06	4,50E-07	3,50E-07	2,90E-07	2,50E-07	2,30E-07
Ra-228	3,00E-05	5,70E-06	3,40E-06	3,90E-06	5,30E-06	6,90E-07
Ac-228	7,40E-09	2,80E-09	1,40E-09	8,70E-10	5,30E-10	4,30E-10
Th-228	3,70E-06	3,70E-07	2,20E-07	1,40E-07	9,40E-08	7,20E-08
Ra-224	2,70E-06	6,60E-07	3,50E-07	2,60E-07	2,00E-07	6,50E-08
Pb-212	1,50E-07	6,30E-08	3,30E-08	2,00E-08	1,30E-08	6,00E-09
Bi-212	3,20E-09	1,80E-09	8,70E-10	5,00E-10	3,30E-10	2,60E-10
Th-232+	4,12E-05	7,25E-06	4,36E-06	4,61E-06	5,86E-06	1,06E-06
Am-241	3,70E-06	3,70E-07	2,70E-07	2,20E-07	2,00E-07	2,00E-07

3093
3094

3095 10.5 Empoussièrement

3096 Il s'agit de poussières en suspension dans l'atmosphère de l'environnement d'une activité générant une
3097 quantité significative d'aérosols, comme par exemple la réfection d'un mur à l'intérieur d'un bâtiment. Le
3098 tableau VIII présente des gammes de valeurs d'empoussièrement issues de la littérature.

3099 **Tableau VIII : Gammes de valeurs d'empoussièrement**

Degré d'empoussièrement	Très faible	Faible	Moyen	Elevé
Gamme de valeur ($mg.m^{-3}$)	[0,001 – 0,01[	[0,01 – 0,1[	[0,1 – 10[	[10 – 100]
Activités types associées	sommeil…	activités à l'extérieur…	maraîchage…	travaux de chantier, réfection de mur…

L'attention du lecteur est attirée sur le fait que l'utilisation de valeurs tirées de la littérature est une manière de procéder relativement hasardeuse, les valeurs pouvant grandement fluctuer d'une situation à l'autre pour une même activité. C'est pourquoi il est vivement conseillé de procéder plutôt à la mesure de l'empoussièrement lorsque cela est possible.

10.6 Fraction inhalable

La courbe de la figure 6 présente la fraction inhalable, c'est-à-dire la fraction des aérosols présents dans l'atmosphère pénétrant effectivement l'appareil respiratoire de l'individu, en fonction de la granulométrie des aérosols.

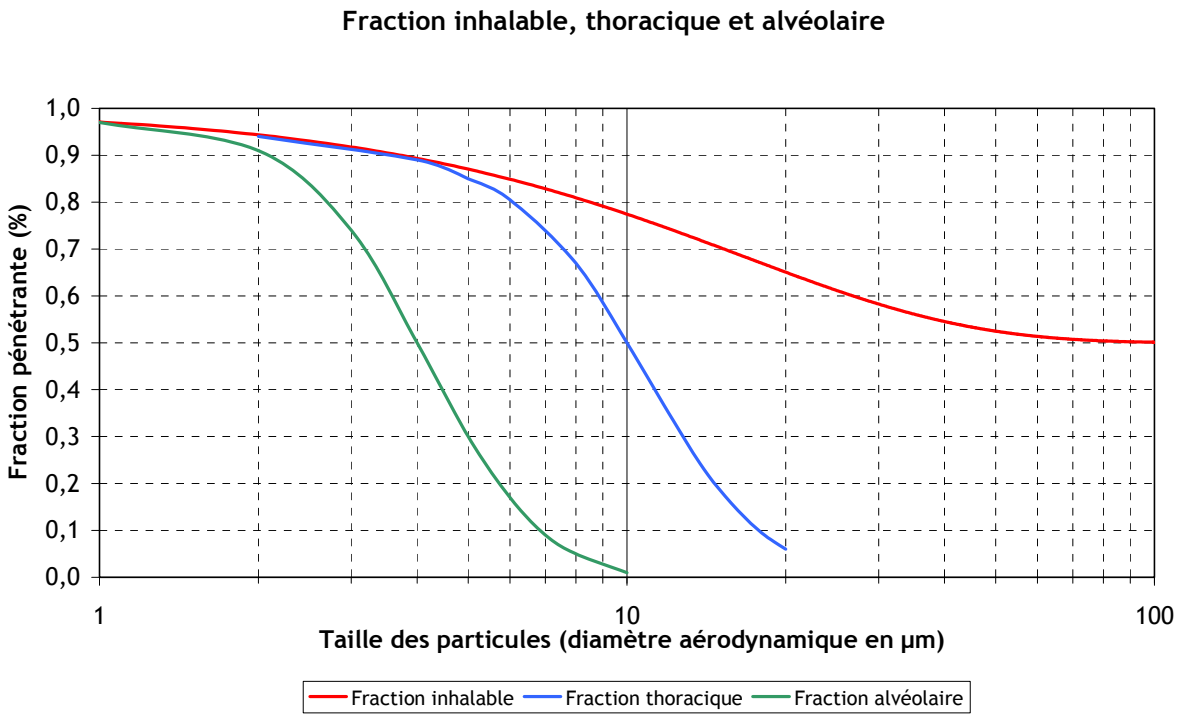


Figure 6 : Fraction inhalable

La granulométrie des aérosols présents dans l'atmosphère des lieux est généralement une information indisponible. Dans ce cas, la valeur de 1 pour la fraction inhalable doit être retenue, de manière pénalisante.

10.7 Régime alimentaire et degré d'autarcie

De nombreuses études existent portant sur le régime alimentaire de l'homme ; ainsi des études en références [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], dont la liste n'est pas exhaustive. Les études sont en général très disparates ; en effet, les classes d'âge, les zones géographiques concernées et les aliments étudiés varient considérablement d'une étude à l'autre, en fonction du contexte et de l'objectif des auteurs. La banque de données CIBLEX [16] établie conjointement par l'IRSN et l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) peut également être consultée (www.irsn.fr, www.ademe.fr), ainsi que les diverses

publications de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA, www.afssa.fr), notamment l'étude dites INCA2 [17].

A titre d'exemple, les tableaux IX et X, extraits de l'étude de l'IRSN en référence [18] qui s'appuie sur l'étude de l'Institut National de la Statistiques et des Etudes Economiques dite INSEE91 [9], sur le document de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique en référence [19] ainsi que sur l'article en référence [20] (pour les poissons), montre un exemple de régime alimentaire moyen français, selon que l'on considère un individu moyen de la population française, ou plus particulièrement un individu moyen de la population française vivant en milieu rural.

Tableau IX : Consommation et degré d'autarcie
Individu moyen de la population française

Aliments	Consommation (kg.an^{-1} ou L.an^{-1})				Degré d'autarcie
	Adulte*	1-2 ans	3-7 ans	8-12 ans	
Légumes feuilles	20	13	16	17	0,267
Légumes fruits	74	25	51	61	0,135
Légumes racines	9	6	7	8	0,237
Pomme de terre	32	9	14	21	0,237
Céréales et dérivés	55	18	27	37	0,001
Viande de bœuf	19	4	8	12	0,028
Viande de mouton	7	2	3	4	0,044
Viande de porc	24	5	10	15	0,037
Viande de volaille	20	4	8	13	0,164
Œufs	8	1	3	5	0,169
Lait	66	86	37	48	0,036
Produits laitiers	37	0	17	24	0,012
Poissons	11	1	3	5	0,047

* : les adolescents sont considérés avoir le même régime alimentaire que les adultes

Tableau X : Consommation et degré d'autarcie Individu moyen de la population française vivant en commune rurale

Aliments	Consommation (kg.an^{-1} ou L.an^{-1})				Degré d'autarcie
	Adulte*	1-2 ans	3-7 ans	8-12 ans	
Légumes feuilles	28	17	22	24	0,707
Légumes fruits	75	25	51	62	0,306
Légumes racines	12	8	9	10	0,675
Pomme de terre	44	13	20	29	0,767
Céréales et dérivés	75	25	37	51	0,001
Viande de bœuf	20	4	8	13	0,365
Viande de mouton	4	1	1	2	0,435
Viande de porc	27	6	11	17	0,292
Viande de volaille	26	6	11	17	0,734
Œufs	10	1	4	6	0,631
Lait	88	115	49	65	0,301
Produits laitiers	31	0	14	19	0,059
Poissons	9	1	2	4	0,161

* : les adolescents sont considérés avoir le même régime alimentaire que les adultes

L'attention du lecteur est attirée sur le fait que les valeurs indiquées dans cette étude relativement à la consommation de poissons sont des moyennes issues de données dont la représentativité est limitée. Pour ne pas risquer de sous-estimer les doses calculées, des études locales sont préférables, surtout si les lieux sur lesquels portent les EQER sont situés en bord de mer. A titre indicatif, le tableau XI présente les valeurs utilisées par le Groupe Radioécologie Nord Cotentin (GRNC), issu des études en références [11] et [12].

Tableau XI : Consommation de poissons retenue par le GRNC

Aliments	Consommation (kg.an^{-1})			
	Adulte	1-2 ans	3-7 ans	8-12 ans
Poissons	23	2	6	10

Cette même étude de l'IRSN en référence [18] fournit des valeurs moyennes pour les grandes zones géographiques considérées dans l'étude INSEE 91 [9].

Pour ce qui est des nourrissons considérés comme la classe d'âge des enfants de 0 à 1 an, une valeur de 256 L.an^{-1} pour la consommation annuelle de lait peut être utilisée ; elle est extraite de l'étude en référence [15]. Il s'agit d'une valeur qui ne rend pas forcément compte de l'évolution en quantité et en diversité de

l'alimentation des jeunes enfants ; l'étude de l'AFSSA en référence [14] peut être consultée utilement pour une description plus précise de cette tranche d'âge.

10.8 Eau de boisson

La banque de données CIBLEX [16] fournit des données et peut être consultée utilement ; le tableau XII présente des valeurs extraites de cette référence. Les consommations d'eau présentées correspondent aux besoins en eau ; pour les quatre premières classes d'âge, une valeur moyenne est proposée par cette référence, assortie d'un intervalle (min., max.).

Tableau XII : Consommation d'eau

Classe d'âge	Consommation ($L.j^{-1}$)
Nourrisson (< 1 an)	[0,33 – **0,55** – 0,68]
Enfant de 1 – 2 ans	[0,60 – **0,80** – 0,95]
Enfant de 3 – 7 ans	[0,95 – **1,30** – 1,60]
Enfant de 8 – 12 ans	[0,95 – **1,50** – 2,00]
Adolescent de 13 – 17 ans	1,50
Adulte (≥ 18 ans)	1,50

D'autres sources peuvent être consultées utilement comme l'étude INCA2 de l'AFSSA [17] par exemple.

10.9 Ingestion par inadvertance

Il s'agit de l'ingestion par inadvertance de sol ou de sable (sur les berges des plans d'eau), ou encore d'eau au cours de baignades. Le tableau XIII présente des valeurs qui ont été considérées par le GRNC [21]

Tableau XIII : Consommation par inadvertance

	1-2 ans	3-7 ans	8-12 ans	13-17 ans	Adulte
Sol ($kg.an^{-1}$)	$3,7\ 10^{-2}$	$7,3\ 10^{-3}$	$3,7\ 10^{-3}$	$1,8\ 10^{-3}$	$1,8\ 10^{-3}$
Sable ($kg.an^{-1}$)	$5\ 10^{-3}$	$2\ 10^{-3}$	$1\ 10^{-3}$	$5\ 10^{-4}$	$5\ 10^{-4}$
Eau ($L.an^{-1}$)	$5\ 10^{-2}$	$1\ 10^{-1}$	$1\ 10^{-1}$	$1\ 10^{-1}$	$1\ 10^{-1}$

10.10 Transfert aux végétaux

Le tableau XIV présente des valeurs du coefficient de transfert racinaire, issus d'une compilation de l'IRSN [22]. le signe (-) indique qu'il n'existe pas de valeur. D'autres références peuvent être consultées, notamment la synthèse en référence [23] du Commissariat à l'Energie Atomique ou encore le rapport de l'AIEA en référence [24].

Tableau XIV : Facteur de transfert racinaire ($kg_{sol\ sec}.kg^{-1}_{végétal\ frais}$)

	Légumes feuilles	Légumes racines*	Légumes fruits	Herbe
H	-	-	-	-
C	-	-	-	-
Mn	4,10E-02	1,50E-02	4,80E-02	4,90E-01
Co	1,70E-02	1,30E-02	7,50E-03	2,20E-04
Sr	2,10E-01	6,00E-02	6,00E-03	2,20E-01
Y	-	-	-	-
I	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02	3,40E-04
Cs	1,60E-02	1,60E-02	6,90E-03	2,60E-02
Ba	1,00E-02	5,00E-03	2,90E-02	1,00E-02
Pb	8,00E-04	2,70E-03	6,80E-02	2,10E-04
Bi	-	-	-	-
Po	2,00E-04	1,30E-03	2,00E-04	2,00E-04
At	-	-	-	-
Rn	-	-	-	-
Fr	-	-	-	-
Ra	3,90E-03	2,50E-03	1,10E-02	8,00E-03
Ac	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03
Th	1,40E-04	2,50E-05	3,00E-05	1,10E-03
Pa	4,00E-02	4,00E-02	2,50E-03	4,00E-02
U	6,60E-04	2,00E-03	9,00E-02	2,30E-03
Np	3,00E-03	1,50E-03	4,80E-03	2,30E-03
Pu	5,80E-06	4,50E-05	1,20E-05	1,00E-04
Am	5,30E-05	8,40E-05	9,80E-05	1,40E-04
Cm	6,20E-05	1,80E-04	1,90E-04	7,10E-05
Cf	2,50E-03	2,50E-03	2,50E-03	2,50E-03

* : y compris les pommes de terre

10.11 Transfert aux aliments d'origine animale

Le tableau XV présente des valeurs du coefficient de transfert aux produits d'origine animale. Le signe (-) indique qu'il n'existe pas de valeur.

Tableau XV : Facteur de transfert aux aliments d'origine animale ($j.kg^{-1}$ ou $j.L^{-1}$)

	Lait de vache	Lait de brebis	Viande de bœuf	Viande de mouton	Viande de porc	Œufs	Volailles
H	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-
Mn	1,00E-04	2,00E-03	5,00E-04	5,00E-02	4,00E-03	7,00E-02	5,00E-02
Co	2,00E-03	1,00E-02	1,00E-03	1,00E-02	2,00E-01	1,00E-03	1,00E-03
Sr	2,00E-03	1,00E-02	3,00E-04	3,00E-03	2,00E-03	3,00E-01	4,00E-02
Y	-	-	-	-	-	-	-
I	5,00E-03	5,00E-01	2,00E-03	5,00E-02	5,00E-03	3,00E+00	1,00E-01
Cs	5,00E-03	6,00E-02	3,00E-02	5,00E-01	4,00E-01	5,00E-01	4,50E+00
Ba	5,00E-04	3,00E-03	5,00E-04	5,00E-03	5,00E-04	9,00E-01	2,00E-02
Tl	3,00E-03	3,00E-03	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02
Pb	3,00E-04	3,00E-04	1,00E-03	1,00E-02	9,90E-04	2,00E-03	9,90E-04
Bi	-	-	-	-	-	-	-
Po	1,00E-04	1,00E-04	3,00E-03	3,00E-02	9,90E-04	1,80E-02	9,90E-04
At	-	-	-	-	-	-	-
Rn	-	-	-	-	-	-	-
Fr	-	-	-	-	-	-	-
Ra	4,00E-04	4,00E-04	5,00E-04	5,00E-03	2,60E-04	2,00E-05	9,90E-04
Ac	3,00E-06	3,00E-06	1,00E-04	1,00E-03	1,00E-02	2,00E-03	4,00E-03
Th	5,00E-06	5,00E-06	1,00E-04	1,00E-03	1,00E-02	2,00E-03	4,00E-03
Pa	5,00E-06	5,00E-06	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-02	2,00E-03	4,00E-03
U	6,00E-04	6,00E-04	2,00E-04	2,00E-03	4,00E-02	1,00E+00	1,00E+00
Np	1,00E-06	5,00E-06	1,00E-04	4,00E-04	1,00E-02	2,00E-03	4,00E-03
Pu	1,00E-06	5,00E-06	1,00E-04	4,00E-04	3,40E-06	8,00E-03	2,00E-04
Am	1,00E-06	5,00E-06	1,00E-04	4,00E-04	1,20E-05	9,00E-03	2,00E-04
Cm	1,00E-06	5,00E-06	1,00E-04	4,00E-04	1,20E-01	3,90E-05	7,20E-05
Cf	2,00E-06	2,00E-06	6,00E-05	6,00E-05	1,00E-02	2,00E-03	4,00E-03

10.12 Transfert au poisson

Le tableau XVI présente des valeurs du coefficient de transfert aux parties comestibles des poissons, issus de la compilation du rapport de l'AIEA en référence [24].

Tableau XVI : Facteur de transfert au poisson ($m^3.kg^{-1}$)

Elément	$F_{poisson}$ ($m^3.kg^{-1}$)	Elément	$F_{poisson}$ ($m^3.kg^{-1}$)	Elément	$F_{poisson}$ ($m^3.kg^{-1}$)
H	1,00E-03	Ba	4,00E-03	Pa	1,00E-02
C	5,00E+01	Tl	1,00E+00	U	1,00E-02
Mn	4,00E-01	Pb	3,00E-01	Np	3,00E-02
Co	3,00E-01	Bi	1,00E-02	Pu	3,00E-02
Ni	1,00E-01	Po	5,00E-02	Am	3,00E-02
Sr	6,00E-02	Fr	1,00E+00	Cm	3,00E-02
Y	3,00E-02	Ra	5,00E-02	Cf	1,00E+00
I	4,00E-02	Ac	1,00E+00		
Cs	2,00E+00	Th	1,00E-01		

11- EXEMPLE D'APPLICATION : BASE DE LOISIRS

A fins d'illustration de la mise en œuvre des scénarios pour le calcul d'une EQER, il est proposé ci-après une application numérique dans le cas d'un site pollué par une ancienne activité d'extraction du radium et destiné à être réaménagé en une base de loisirs — les anciens bâtiments ont été détruits. Il est fait l'hypothèse que le site est resté suffisamment longtemps en friche pour considérer que le radium 228 a totalement disparu (période radioactive égale à 5,75 ans), et que seul le radium 226 est présent.

11.1 Données d'entrée

Les données d'entrée pour le calcul de la dose sont supposées les suivantes :

- l'activité volumique de l'air à l'intérieur des bâtiments projetés est supposée égale à l'activité volumique de l'air à l'extérieur ;
- l'activité volumique de l'air au-dessus des surfaces non couvertes : 10^{-3} $Bq.m^{-3}$;
- le débit de dose ambiant dans les bâtiments projetés : supposé nul ;
- le débit de dose ambiant à 1 m au -dessus des sols non couverts : 0,5 $\mu Sv.h^{-1}$;
- l'activité massique du sol, en distinguant en tant que de besoin entre les surfaces couvertes, les espaces verts, le potager, les berges du plan d'eau : 50 $Bq.g^{-1}$;
- l'activité massique des structures : sans objet ;
- l'activité volumique de l'eau du plan d'eau : 0,05 $Bq.L^{-1}$.

L'homogénéité de la pollution résiduelle dans les sols est supposée, comme dans l'eau et l'air. Il est considéré que la surface hors bâtiment de la base de loisirs se distribue à hauteur de 5 % pour les surfaces extérieures

couvertes (par un bitume d'épaisseur égale à 5 cm), 10 % pour la surface de plan d'eau, 11 % pour les berges et 74 % pour les espaces verts.

La base de loisirs est fréquentée régulièrement par une famille des environs qui représente toutes les classes d'âge. La fréquence supposée est de 20 visites dans l'année, avec une durée moyenne de présence de 4 heures par visite. Le nourrisson est supposé dormir l'essentiel du temps de présence.

Les activités d'intérieur sont supposées correspondre à 10 % du temps de visite pour toutes les classes d'âge, et se distribuer en 50 % en repos et 50 % en exercice léger ; les activités d'extérieur sont supposées correspondre à 90 % du temps de visite, et se distribuer selon 1/2 de repos, 3/8 d'exercice léger et 1/8 d'exercice lourd.

Les activités d'extérieur (hors baignade) correspondent à 90 % du temps de visite pour toutes les classes d'âge, et se distribuent sur les différentes surfaces (couvertes, espaces verts, berges et plan d'eau) au prorata des valeurs des surfaces correspondantes. Le temps de baignade est nul pour les enfants de moins de 2 ans, de 2 heures par an pour les enfants de 3 à 7 ans et de 5 heures par an pour les individus de plus de 7 ans.

11.2 Calcul des expositions

11.2.1 Exposition interne par inhalation à l'intérieur – activités usuelles

$$E_{inhalation-intérieur-activités\ usuelles}(rn,ca) = A_{air-intérieur}(rn).D_r(ca).BT_{intérieur-hors\ sommeil}(ca).N.DPUI_{inhalation}(rn,ca)$$

$E_{inhalation-intérieur-activités\ usuelles}$: Dose efficace par inhalation à l'intérieur pendant l'exercice d'activités usuelles, $mSv.an^{-1}$

$A_{air-intérieur}$: Activité volumique de l'air dans les bâtiments, **10^{-3} Bq.m^{-3}**

D_r : Débit respiratoire, $m^3.h^{-1}$, **valeurs du tableau V (publication 66 de la CIPR [7]), pondérées par la distribution 50 % repos / 50 % exercice léger**

$BT_{intérieur-hors\ sommeil}$: Budget temps passé à l'intérieur hors sommeil, $h.j^{-1}$, **10 % de 4 heures par visite**

N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$, **20 visites par an**

$DPUI_{inhalation}$: Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, $mSv.\ Bq^{-1}$, **valeurs réglementaires du tableau 1.2 de l'arrêté du 1er septembre 2003 [2] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226**

Tableau XVII : Calcul de la dose par exposition interne par inhalation à l'intérieur

	D_r ($m^3.h^{-1}$)	$DPUI_{inhalation}$ ($mSv.Bq^{-1}$)	$E_{inhalation-intérieur-activités\ usuelles}$ **$mSv.an^{-1}$**
< 1 an	0,09	$3,55\ 10^{-2}$	$2,56\ 10^{-5}$
1 – 2 ans	0,29	$2,61\ 10^{-2}$	$6,06\ 10^{-5}$
3 – 7 ans	0,45	$1,61\ 10^{-2}$	$5,80\ 10^{-5}$
8 – 12 ans	0,75	$1,12\ 10^{-2}$	$6,72\ 10^{-5}$
13 – 17 ans	0,93 / 0,85	$9,94\ 10^{-3}$	$7,40\ 10^{-5}$ / $6,76\ 10^{-5}$
≥ 18 ans	1,02 / 0,82	$8,02\ 10^{-3}$	$6,54\ 10^{-5}$ / $5,26\ 10^{-5}$

11.2.3 Exposition externe à l'air à l'intérieur – activités usuelles

$$E_{panache-intérieur-activités\ usuelles}(rn,ca) = A_{air-intérieur}(rn).BT_{intérieur-hors\ sommeil}(ca).N.3600.CD_{panache}(rn)$$

$E_{panache-intérieur-activités\ usuelles}$: Dose efficace par exposition externe à l'air à l'intérieur pendant l'exercice d'activités usuelles, $mSv.an^{-1}$

$A_{air-intérieur}$: Activité volumique de l'air dans les bâtiments, **10^{-3} Bq.m^{-3}**

$BT_{intérieur-hors\ sommeil}$: Budget temps passé à l'intérieur hors sommeil, $h.j^{-1}$, **10 % de 4 heures par visite**

N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$, **20 visites par an**

$CD_{panache}$: Coefficient de dose par exposition externe à l'air, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$, **valeurs du tableau III.1 du Federal Guidance 12 [3] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226 — ce qui conduit à la valeur de 8,87 10^{-11} mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3**

Tableau XVIII : Calcul de la dose par exposition externe à l'air intérieur

	$E_{panache-intérieur-activités\ usuelles}$ mSv.an^{-1}
< 1 an	2,55 10^{-9}
1 – 2 ans	2,55 10^{-9}
3 – 7 ans	2,55 10^{-9}
8 – 12 ans	2,55 10^{-9}
13 – 17 ans	2,55 10^{-9}
≥ 18 ans	2,55 10^{-9}

11.2.4 Exposition interne par inhalation à l'extérieur

$$E_{inhalation-extérieur}(rn,ca) = A_{air-extérieur}(rn).D_r(ca).BT_{extérieur}(ca).N.DPUI_{inhalation}(rn,ca)$$

$E_{inhalation-extérieur}$: Dose efficace par inhalation à l'extérieur, $mSv.an^{-1}$

$A_{air-extérieur}$: Activité volumique de l'air à l'extérieur, **10^{-3} Bq.m^{-3}**

D_r : Débit respiratoire, $m^3.h^{-1}$, **valeurs issues du tableau V (publication 66 de la CIPR [7]), pondérées par la distribution 1/2 repos, 3/8 exercice léger, 1/8 exercice lourd pour les enfants de plus de 8 ans, et par la distribution 50 % repos / 50 % exercice léger pour les enfants de moins de 8 ans (hors nourrissons)**

$BT_{extérieur}$: Budget temps passé à l'extérieur, $h.j^{-1}$, **90 % de 4 heures par visite**

N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$, **20 visites par an**

$DPUI_{inhalation}$: Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, $mSv.\ Bq^{-1}$, **valeurs réglementaires du tableau 1.2 de l'arrêté du 1er septembre 2003 [2] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226**

Tableau XIX : Calcul de la dose par exposition interne par inhalation à l'intérieur

	D_r ($m^3.h^{-1}$)	$DPUI_{inhalation}$ ($mSv.Bq^{-1}$)	$E_{inhalation-extérieur}$ **$mSv.an^{-1}$**
< 1 an	0,09	$3,55\ 10^{-2}$	$2,30\ 10^{-4}$
1 – 2 ans	0,29	$2,61\ 10^{-2}$	$5,45\ 10^{-4}$
3 – 7 ans	0,45	$1,61\ 10^{-2}$	$5,22\ 10^{-4}$
8 – 12 ans	0,89 / 0,84	$1,12\ 10^{-2}$	$7,18\ 10^{-4}$ / $6,77\ 10^{-4}$
13 – 17 ans	1,12 / 1,01	$9,94\ 10^{-3}$	$7,58\ 10^{-4}$ / $6,84\ 10^{-4}$
≥ 18 ans	1,21 / 1,00	$8,02\ 10^{-3}$	$6,99\ 10^{-4}$ / $5,77\ 10^{-4}$

11.2.5 Exposition externe à l'air à l'extérieur – activités usuelles

$$E_{panache-extérieur-activités\ usuelles}(rn, ca) = A_{air-extérieur}(rn).BT_{extérieur}(ca).N.3600.CD_{panache}(rn)$$

$E_{panache-extérieur-activités\ usuelles}$: Dose efficace par exposition externe à l'air à l'extérieur pendant l'exercice d'activités usuelles, $mSv.an^{-1}$
$A_{air-extérieur}$: Activité volumique de l'air à l'extérieur, **10^{-3} Bq.m^{-3}**
$BT_{extérieur}$: Budget temps passé à l'extérieur, $h.j^{-1}$, **90 % de 4 heures par visite**
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$, **20 visites par an**
$CD_{panache}$: Coefficient de dose par exposition externe à l'air, $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$, **valeurs du tableau III.1 du Federal Guidance 12 [3] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226 — ce qui conduit à la valeur de $8,87\ 10^{-11}$ $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$**

Tableau XX : Calcul de la dose par exposition externe à l'air extérieur

	$E_{panache-extérieur-activités\ usuelles}$ **$mSv.an^{-1}$**
< 1 an	$2,30\ 10^{-8}$
1 – 2 ans	$2,30\ 10^{-8}$
3 – 7 ans	$2,30\ 10^{-8}$
8 – 12 ans	$2,30\ 10^{-8}$
13 – 17 ans	$2,30\ 10^{-8}$
≥ 18 ans	$2,30\ 10^{-8}$

11.2.6 Exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes

$$E_{dépôt-extérieur-surfaces\ couvertes}(rn,ca) = A_{sol-surfaces\ couvertes}(rn).\rho_{sol}.10^{3}.BT_{extérieur-surfaces\ couvertes}(ca).N.3600.CD_{dépôt}(rn).F_{p}(rn)$$

$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}surfaces\ couvertes}$: Dose efficace par exposition externe au dépôt à l'extérieur sur des surfaces couvertes, $mSv.an^{-1}$
$A_{sol\text{-}surfaces\ couvertes}$: Activité massique des sols recouverts par des surfaces (bitume, béton, gravier, etc.), **50 Bq.g^{-1}**
ρ_{sol} : Masse volumique du sol, **1600 kg.m^{-3}**
$BT_{extérieur\text{-}surfaces\ couvertes}$: Budget temps passé à l'extérieur sur des surfaces couvertes, **5 % de 90 % de 4 heures par visite**
N : Nombre de jours considérés, $j.an^{-1}$, **20 visites par an**
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie), **valeurs du tableau III.7 du Federal Guidance 12 [3] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226 — ce qui conduit à la valeur de 5,99 10^{-14} mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{3}**
F_p : Facteur d'atténuation apporté au rayonnement d'un radionucléide par la couverture d'une surface, valeur du tableau VI (bitume d'épaisseur 5 cm — 0,609)

Tableau XXI : Calcul de la dose par exposition externe au dépôt à l'extérieur – surfaces couvertes

	$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}surfaces\ couvertes}$ $mSv.an^{-1}$
< 1 an	3,78 10^{-2}
1 – 2 ans	3,78 10^{-2}
3 – 7 ans	3,78 10^{-2}
8 – 12 ans	3,78 10^{-2}
13 – 17 ans	3,78 10^{-2}
≥ 18 ans	3,78 10^{-2}

11.2.7 Exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts

$$E_{dépôt-extérieur-espaces\ verts}(rn,ca) = A_{sol-espaces\ verts}(rn).\rho_{sol}.10^{3}.BT_{extérieur-espaces\ verts}(ca).N.3600.CD_{dépôt}(rn)$$

$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}espace\ verts}$: Dose efficace par exposition externe au dépôt à l'extérieur sur des espaces verts, $mSv.an^{-1}$
$A_{sol\text{-}espaces\ verts}$: Activité massique des sols des espaces verts, **50 Bq.g^{-1}**
ρ_{sol} : Masse volumique du sol, **1600 kg.m^{-3}**
$BT_{extérieur\text{-}espaces\ verts}$: Budget temps passé à l'extérieur sur des espaces verts, **74 % de 90 % de 4 heures par visite**
N : Nombre de jours considérés, **20 visites par an**
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie), **valeurs du tableau III.7 du Federal Guidance 12 [3] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226 — ce qui conduit à la valeur de 5,99 10^{-14} mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{3}**

Tableau XXII : Calcul de la dose par exposition externe au dépôt à l'extérieur – espaces verts

	$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}espaces\ verts}$ **mSv.an^{-1}**
< 1 an	9,19 10^{-1}
1 – 2 ans	9,19 10^{-1}
3 – 7 ans	9,19 10^{-1}
8 – 12 ans	9,19 10^{-1}
13 – 17 ans	9,19 10^{-1}
≥ 18 ans	9,19 10^{-1}

11.2.8 Exposition externe au dépôt à l'extérieur – berges

$$E_{dépôt-extérieur-berges}(rn,ca) = A_{sol-berges}(rn).\rho_{berges}.10^{3}.BT_{extérieur-berges}(ca).N.3600.CD_{dépôt}(rn)$$

$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}berges}$: Dose efficace par exposition externe au dépôt à l'extérieur et sur les berges, mSv.an^{-1}
$A_{sol\text{-}berges}$: Activité massique dans les sédiments des berges, **50 Bq.g^{-1}**
ρ_{berges} : Masse volumique des sédiments des berges, **1600 kg.m^{-3}**
$BT_{extérieur\text{-}berge}$: Durée de présence sur les berges, **11 % de 90 % de 4 heures par visite pour les individus de plus de 8 ans et 21 % de 90 % de 4 heures par visite pour les autres**
N : Nombre de jours considérés, **20 visites par an**
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie), **valeurs du tableau III.7 du Federal Guidance 12 [3] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226 — ce qui conduit à la valeur de 5,99 10^{-14} mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^{3}**

Tableau XXIII : Calcul de la dose par exposition externe au dépôt à l'extérieur – berges

	$E_{dépôt\text{-}extérieur\text{-}berges}$ **mSv.an^{-1}**
< 1 an	2,61 10^{-1}
1 – 2 ans	2,61 10^{-1}
3 – 7 ans	2,61 10^{-1}
8 – 12 ans	1,37 10^{-1}
13 – 17 ans	1,37 10^{-1}
≥ 18 ans	1,37 10^{-1}

11.2.9 Exposition externe à un plan d'eau à l'extérieur

$$E_{dépôt-extérieur-plan\ d'eau}(rn, ca) = A_{eau-plan\ d'eau}(rn).10^3.BT_{extérieur-plan\ d'eau}(ca).3600.CD_{dépôt}(rn)$$

$E_{dépôt-extérieur-plan\ d'eau}$: Dose efficace par exposition externe à l'extérieur et sur un plan d'eau, $mSv.an^{-1}$
$A_{eau-plan\ d'eau}$: Activité volumique de l'eau d'une mare ou d'un plan d'eau, **0,05 $Bq.L^{-1}$**
$BT_{extérieur-plan\ d'eau}$: Budget temps consacré à des activités sur un plan d'eau, $h.an^{-1}$, **10 % de 90 % de 4 heures par visite pour les individus de plus de 8 ans et nul pour les autres individus**
$CD_{dépôt}$: Coefficient de dose par exposition externe aux dépôts (épaisseur infinie) , **valeurs du tableau III.7 du Federal Guidance 12 [3] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226 — ce qui conduit à la valeur de 5,99 10^{-14} $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$; cette valeur sous-estime vraisemblablement la réalité, car elle est calculée pour un milieu de densité 1,6.**

Tableau XXIV : Calcul de la dose par exposition externe au dépôt à l'extérieur – plan d'eau

	$E_{dépôt-extérieur-plan\ d'eau}$ $mSv.an^{-1}$
< 1 an	0
1 – 2 ans	0
3 – 7 ans	0
8 – 12 ans	$7,76\ 10^{-8}$
13 – 17 ans	$7,76\ 10^{-8}$
≥ 18 ans	$7,76\ 10^{-8}$

11.2.10 Exposition externe à l'extérieur – baignade

$$E_{baignade}(rn, ca) = A_{eau-plan\ d'eau}(rn).10^3.BT_{extérieur-baignade}(ca).3600.CD_{immersion}(rn)$$

$E_{baignade}$: Dose efficace par baignade, $mSv.an^{-1}$
$A_{eau-plan\ d'eau}$: Activité volumique de l'eau d'une mare ou d'un plan d'eau, **0,05 $Bq.L^{-1}$**
$BT_{extérieur-baignade}$: Budget temps consacré à de la baignade, **nul pour les nourrissons et les enfants de 1 à 2 ans, 2 $h.an^{-1}$ pour les enfants de 3 à 7 ans et 5 $h.an^{-1}$ pour les autres individus**
$CD_{immersion}$: Coefficient de dose par exposition externe par immersion dans l'eau, **valeurs du tableau III.2 du Federal Guidance [3] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226 — ce qui conduit à la valeur de 1,93 10^{-13} $mSv.s^{-1}.Bq^{-1}.m^3$**

Tableau XXV : Calcul de la dose par exposition externe par baignade

	$E_{baignade}$ $mSv.an^{-1}$
< 1 an	0
1 – 2 ans	0
3 – 7 ans	$6,95\ 10^{-8}$
8 – 12 ans	$1,74\ 10^{-7}$
13 – 17 ans	$1,74\ 10^{-7}$
≥ 18 ans	$1,74\ 10^{-7}$

11.2.11 Exposition interne par ingestion d'eau par inadvertance

$$E_{ingestion-eau\ par\ inadvertance}(rn, ca) = A_{eau-plan\ d'eau}(rn).Q_{eau-baignade}(ca).DPUI_{ingestion}(rn, ca)$$

$E_{ingestion-eau\ par\ inadvertance}$: Dose efficace par ingestion d'eau par inadvertance (activité de baignade), mSv.an^{-1}
$A_{eau-plan\ d'eau}$: Activité volumique de l'eau d'une mare ou d'un plan d'eau, **0,05 Bq.L^{-1}**
$Q_{eau-baignade}$: Consommation d'eau par inadvertance lors de la baignade, **0,05 L.an^{-1} pour les enfants de 1 à 2 ans et 0,1 L.an-1 pour les autres individus (valeurs du tableau XIII)**
$DPUI_{ingestion}$: Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion, mSv. Bq^{-1}, **valeurs réglementaires du tableau 1.1 de l'arrêté du 1er septembre 2003 [2] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226**

Tableau XXVI : Calcul de la dose par exposition interne par ingestion d'eau par inadvertance

	$Q_{eau-baignade}$ (L.an^{-1})	$DPUI_{ingestion}$ (mSv.Bq^{-1})	$E_{ingestion-eau\ par\ inadvertance}$ **mSv.an^{-1}**
< 1 an	0	3,91 10^{-2}	0
1 – 2 ans	0,05	1,34 10^{-2}	3,35 10^{-5}
3 – 7 ans	0,10	7,23 10^{-3}	3,62 10^{-5}
8 – 12 ans	0,10	5,30 10^{-3}	2,65 10^{-5}
13 – 17 ans	0,10	5,00 10^{-3}	2,50 10^{-5}
≥ 18 ans	0,10	2,17 10^{-3}	1,09 10^{-5}

11.2.12 Exposition interne par ingestion de sol par inadvertance

$$E_{ingestion-sol\ par\ inadvertance}(rn, ca) = A_{sol}(rn).Q_{sol}(ca).DPUI_{ingestion}(rn, ca)$$

$E_{ingestion-sol\ par\ inadvertance}$: Dose efficace par ingestion de sol par inadvertance, mSv.an^{-1}
A_{sol} : Activité massique d'un sol extérieur : surface couverte, ou espace vert, ou potager ou berge, **50 Bq.g^{-1}**
Q_{sol} : Consommation de sol par inadvertance, g.an^{-1}, **valeurs du tableau XIII pour lesquelles les quantités consommées de sol et de sable sont sommées (puisqu'il y a des berges de plan d'eau) ; ces valeurs sont vraisemblablement pénalisantes dans la mesure où les individus de ce scénario ne fréquentent la base de loisirs que 80 heures par an**
$DPUI_{ingestion}$: Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion, mSv. Bq^{-1}, **valeurs réglementaires du tableau 1.1 de l'arrêté du 1er septembre 2003 [2] en considérant à l'équilibre tous les radionucléides de la filiation du radium 226**

Tableau XXVII : Calcul de la dose par exposition interne par ingestion de sol et de sable par inadvertance

	Q_{sol} (g.an^{-1})	Q_{sable} (g.an^{-1})	$DPUI_{ingestion}$ (mSv.Bq^{-1})	$E_{ingestion-sol\ et\ sable\ par\ inadvertance}$ **mSv.an^{-1}**
< 1 an	0	0	3,91 10^{-2}	0
1 – 2 ans	37	5	1,34 10^{-2}	28,14
3 – 7 ans	7,3	2	7,23 10^{-3}	3,36
8 – 12 ans	3,7	1	5,30 10^{-3}	1,25
13 – 17 ans	1,8	0,5	5,00 10^{-3}	0,58
≥ 18 ans	1,8	0,5	2,17 10^{-3}	0,25

12- REFERENCES

[1] ICRP Publication 38 – Radionuclide Transformations – Energy and Intensity of Emissions, Annals of the ICRP, Volumes 11 – 13, Pergamon, 1983

[2] Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants, Journal Officiel de la République Française N°262 du 13 novembre 2003

[3] **K. F. ECKERMAN AND J.C. RYMAN,** External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil, Federal Guidance Report 12 – EPA 402-R-93-081, 1993

[4] **M.-L. PERRIN,** Base de données de coefficients de dose – ECRIN V1 Internet – Manuel de référence, Note Technique SEGR 03/48 Indice 0, IRSN, Juillet 2003

[5] **M.-L. PERRIN,** ECRIN V1 Internet – Manuel d'aide en ligne, Note Technique SEGR 03/47 Indice 0, IRSN, Juillet 2003

[6] The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public – Version 2.01, ISBN 0 08 043 8768, Pergamon, 2002

[7] ICRP Publication 66 – Human Respiratory Tract – Model for Radiological Protection, Annals of the ICRP, Volume 24 N° 1-3 1994, Pergamon

[8] **MICROSHIELD VERSION 5**, Verification & Validation Report, Grove Engineering, Révision 5, 1996

[9] **BERTRAND M.**, Consommations et lieux d'achats des produits alimentaires en 1991, collection INSEE Résultats, Consommation-Modes de vie n°54-55, 1993

[10] **DESCAMPS B. ET GUILLET F.**, Enquête alimentaire dans trois secteurs de la basses vallée du Rhône : Codolet, Tresques, Camargue Consommation/Autoconsommation, Rapport DPRE, IPSN, 2001

[11] **MATHIEU P.Y ET MATHIEU CH.**, Etude du régime alimentaire des habitants de la région de Flamanville, Bureau d'étude de géographie et d'écologie appliquée, 1978

[12] **DUFOUR A., DIRECTION SCIENTIFIQUE : VOLATIER J.L.**, Enquête sur la consommation alimentaire dans le Nord Cotentin pour la COGEMA, Rapport final, CREDOC, 1998

[13] **BOGGIO V., GROSSIORD A., GUYON S., FUCHS F. ET FANTINO M**, Consommation alimentaire des nourrissons et des enfants en bas âge en France en 1997, Département de physiologie faculté de médecine, université de Bourgogne, Archives pédiatriques, 1999

[14] **EVEN I., BERTA J.L., VOLATIER J.L.**, Evaluation de l'exposition théorique des nourrissons et des enfants en bas âge aux résidus de pesticides apportés par les aliments courants et infantiles, Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments, 2002,

[15] **DUPIN H, CUQ J.L, MALEWIAK M.I, LEYNAUD-ROUAUD C. ET BERTHIER A.M**, Alimentation et nutrition humaines, ESF éditeur, 1992

[16] Banque de données de paramètres descriptifs de la population française au voisinage d'un site pollué, CD-ROM IRSN ADEME, Novembre 2003

[17] Etude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA 2) 2006-2007, Rapport, AFSSA, Septembre 2009

[18] B. LAHRIGA, Définition de jeux de paramètres pour l'évaluation dosimétrique (rations alimentaires et budgets temps), Note Technique SER/UETP 04-29 Indice 2, IRSN, Novembre 2005

[19] Assessment of doses to the public from ingested radionuclides, IAEA Safety Reports Series n°14, Agence Internationale de l'Energie Atomique, Vienne, 1999

[20] GARROW J. S. ET AL, The diets of British schoolchildren, Department of Health, Report on Health and Social Subjects, Her Majesty's Stationery Office, London, 1989

[21] Estimation des doses et du risque de leucémie associée, Rapport détaillé du GT4 – Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, Volume 4, juillet 1999

[22] C. ROMMENS, Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques, Note Technique SEGR/SAER 97-25 Indice 3, IPSN, Février 1999

[23] A. JOSSET, Synthèse bibliographique de certains facteurs de transfert et de certains coefficients de distribution, CEA, septembre 1979

[24] Handbook of Parameters Values for the Prediction of Radionuclides Transfer in Temperate Environments, Technical Reports Series n°364, Agence Internationale de l'Energie Atomique, Vienne, 1994