

**CARBONE 14** $^{14}\text{C}$   
6**- ASPECTS SANITAIRES -**

*Cette fiche est complémentaire de celle rédigée par le DPRE/SERLAB relative aux aspects environnementaux, les paragraphes généraux I et II étant communs avec ceux de la fiche « aspects environnementaux ».*

*La fiche « aspects sanitaires » fournit à la date de mise à jour, des informations volontairement simplifiées sur les conséquences pour l'homme d'une exposition au radionucléide.*

## I. Caractéristiques

### I.1 Chimiques

Le  $^{14}\text{C}$  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 ( $1,2 \cdot 10^{-12}$  gramme de  $^{14}\text{C}$  par gramme de carbone). Les formes chimiques du  $^{14}\text{C}$  varient suivant le mode de production. Dans l'environnement, il existe sous deux formes principales :

- à l'état de  $\text{CO}_2$ , 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  $\text{CO}_2$  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  $^{14}\text{C}$  peut exister sous d'autres formes. Ainsi, dans les effluents gazeux des réacteurs à eau bouillante, le  $^{14}\text{C}$  est à 95 % sous forme de  $\text{CO}_2$ , à 2,5 % sous forme de monoxyde de carbone CO et à 2,5 % sous forme d'hydrocarbure. Dans les effluents gazeux des réacteurs à eau pressurisée, 80 % du  $^{14}\text{C}$  se trouve sous forme organique (notamment de  $\text{CH}_4$ ) contre 20% sous forme de  $\text{CO}_2$ . Dans les rejets liquides, les formes chimiques sont soit des carbonates, soit des composés organiques indéterminés, sans précision à l'heure actuelle sur les quantités relatives de chacune de ces formes.

### I.2 Nucléaires

		$^{14}\text{C}$
Période radioactive		5 730 ans
Activité massique		$1,65 \cdot 10^{11} \text{ Bq.g}^{-1}$
Emission(s) principale(s) (rendement d'émission pour 100 désintégrations)	Désintégration $\beta^-$ $E_{\text{max}} = 156 \text{ keV (100 \%)}$	

[ICRP, 1983 - Browne et Firestone, 1986]



## II. Origines

### II.1 Naturelle

Le  $^{14}\text{C}$  naturel résulte de l'action des neutrons cosmiques sur les atomes d'azote dans la stratosphère et dans la partie supérieure de la troposphère. Le taux de production annuel est d'environ  $1,54 \cdot 10^{15}$  Bq et la réserve atmosphérique de  $^{14}\text{C}$  à l'équilibre est d'environ  $1,27 \cdot 10^{19}$  Bq [UNSCEAR, 2000]. 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 [Garnier-Laplace *et al.*, 1998].

### 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  $2,1 \cdot 10^{17}$  Bq de  $^{14}\text{C}$ .

#### - Emissions par les réacteurs nucléaires

Dans les réacteurs nucléaires, la production de  $^{14}\text{C}$  provient de 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<sup>-1</sup> de  $^{14}\text{C}$ . Il en rejette annuellement de l'ordre de  $4 \cdot 10^{11}$  Bq, principalement sous forme organique ( $\text{CH}_4$ ). Le reste est rejeté lors du retraitement ou demeure dans les gaines du combustible pour être stocké ultérieurement à l'état de déchets solides [Garnier-Laplace *et al.*, 1998].

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

Le  $^{14}\text{C}$  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 font de manière continue ou discontinue. Dans les usines de retraitement utilisant le procédé PUREX (par exemple à La Hague), le  $^{14}\text{C}$  est libéré principalement sous forme de  $\text{CO}_2$ . L'augmentation à partir du début des années 90 des rejets annuels gazeux de  $^{14}\text{C}$  par l'usine de La Hague correspond au démarrage des usines UP3 et UP2-800. Les rejets gazeux de ces usines ont été estimés à  $1,87 \cdot 10^{13}$  Bq en 1999. Les rejets liquides de l'usine de La Hague en 1999 ont été de  $9,9 \cdot 10^{12}$  Bq.

Pour l'usine de Sellafield (Royaume-Uni) en 1997, les rejets gazeux de  $^{14}\text{C}$  se sont élevés à  $2,2 \cdot 10^{12}$  Bq et les rejets liquides à  $4,4 \cdot 10^{12}$  Bq [BNFL, 1997].

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

On considère qu'à terme, l'intégralité du  $^{14}\text{C}$  utilisé pour le marquage des molécules sera rejeté dans l'atmosphère sous forme de  $\text{CO}_2$ . L'UNSCEAR estime la production annuelle de  $^{14}\text{C}$  à  $3 \cdot 10^{10}$  Bq par million d'habitants dans les pays développés et à  $5 \cdot 10^{13}$  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 [UNSCEAR, 1993].

## III. Utilisations industrielles et médicales

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

## IV. Atteinte de l'homme

### IV.1 Exposition externe

Les coefficients de dose efficace ci-après 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 <sup>3</sup> )
Dépôt	$1,61.10^{-20}$ (Sv /s) / (Bq/m <sup>2</sup> )
Immersion dans l'eau	$4,39.10^{-22}$ (Sv /s) / (Bq/m <sup>3</sup> )

### IV.2 Contamination externe de la peau

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

### IV.3 Exposition interne

#### - Biocinétique

Le modèle biocinétique du carbone est décrit dans les publications 56 et 67 de la CIPR (1990, 1993).

- **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<sub>2</sub> est retenu dans l'organisme par suite de la mise en solution sous forme de bicarbonate. Sous cette forme, une partie se fixe dans l'os [Galle, 1997].

- **Carbone organique** : Le modèle biocinétique pour le carbone décrit dans la CIPR supposent que tous les composés organiques sont distribués rapidement et uniformément dans tous les organes et tissus du corps puis sont retenus avec une période biologique de 40 jours. Cependant, des modèles à plusieurs exponentielles sont nécessaires pour décrire le métabolisme des molécules de carbone organique car les localisations et cinétiques de rétention sont 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 [Galle, 1997].

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

#### - 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.

#### - Coefficients de dose

**Pour le public**, les données ci-après 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<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>** et de **0,2 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>**.

		Dose efficace (Sv /Bq)	
		Adulte	Enfant (1-2 ans)
<b>Inhalation</b>	-Aérosol (type M) $AMAD = 1\mu m$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$6,6 \cdot 10^{-9}$
	-Dioxyde de carbone	$6,2 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$
	-Monoxyde de carbone	$8,0 \cdot 10^{-13}$	$5,7 \cdot 10^{-12}$
	-Vapeur de carbone	$5,8 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$
	-Méthane	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$7,8 \cdot 10^{-12}$
<b>Ingestion</b>		$5,8 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$

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

**Pour les travailleurs**, les données ci-après 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  $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

		Dose efficace (Sv /Bq)
		Adulte
<b>Inhalation</b>	-Dioxyde de carbone	$6,5 \cdot 10^{-12}$
	-Monoxyde de carbone	$8,0 \cdot 10^{-13}$
	-Vapeur de carbone	$5,8 \cdot 10^{-10}$
	-Méthane	$2,9 \cdot 10^{-12}$
<b>Ingestion</b>		$5,8 \cdot 10^{-10}$

#### IV.4 Dangerosité

**-Groupe de radiotoxicité :** indicateur de radiotoxicité au sens du décret 88-521 du 18/04/88.

3 (modérée)

**-Valeur d'exemption :** activité au-dessous de laquelle une pratique est exemptée de déclaration d'après la Directive Européenne n°96/29/EURATOM du 13 mai 1996.

$10^7 \text{ Bq}$

## V. Accidents

En cas de contamination de la peau : décontamination par simple lavage avec des produits si possible adaptés à la forme chimique du radionucléide.

En cas de contamination interne : recueil immédiat des urines et recueil pendant 24 heures et les jours suivants si nécessaire, selon le niveau présumé de la contamination.

Une thérapeutique spécifique incluant notamment la dilution isotopique et la diurèse forcée peut être envisagée sous contrôle médical.

## VI. Textes réglementaires généraux

-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 (J.O.C.E. n°159 du 29 juin 1996). Les limites annuelles de dose 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.

## VII. Bibliographie

-BNFL, Annual Report on Radioactive discharges and monitoring of the environment, 1997.

-BROWNE E., FIRESTONE R., Table of radioactive isotopes, Shirley V Editor., Wiley-Interscience Publication, 1986.

-Calliope, CD-Rom, Collection IPSN, 1999.

-GARNIER-LAPLACE J., ROUSSEL-DEBET S., CALMON P. *Modélisation des transferts du carbone 14, émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal, dans l'environnement proche du site*. Rapport IPSN/DPRE/SERE 98/007, 1998.

-ICRP (International Commission on Radiological Protection) Publication 38, *Radionuclide transformations, Energy and intensity of emissions*, Oxford Pergamon Press, 1983.

-ICRP (International Commission on Radiological Protection) Publication 56, *Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides*, Oxford Pergamon Press, 1990.

-ICRP (International Commission on Radiological Protection) Publication 67, *Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides*, Oxford Pergamon Press, 1993.

-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 (2<sup>e</sup> édition), 1997.

-NCRP, *Carbon 14 in the environment*, National Council on Radiation Protection and measurements, Report n° 81, Bethesda, 1985.

-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 non scellées*, 1996.

-UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), *Sources and effects of ionizing radiation*, New York, United Nations, 1993.

-UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Vol I, *Sources and effects of ionizing radiation*, New York, United Nations, 2000.

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

**Vérificateur : A. Desprès (DPHD)**