

LE CARBONE 14

Comme le tritium, le carbone 14, noté ^{14}C , est produit dans l'environnement et est aussi rejeté par certaines installations nucléaires. Il a également été émis lors des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Cette fiche présente ses origines, les activités rejetées dans l'environnement et leur impact radiologique.

Le carbone possède 7 isotopes : les isotopes ^{12}C et ^{13}C sont stables et représentent la presque totalité du carbone ; l'isotope ^{14}C est radioactif. Il peut être détecté à très bas niveau et est largement utilisé comme outil de datation en archéologie et en géosciences.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Le carbone 14 a les propriétés chimiques du carbone stable et peut donc potentiellement s'associer à tous les composés qui contiennent du carbone. Dans l'environnement, on distingue habituellement deux formes principales : le ^{14}C minéral et le ^{14}C organique. Dans l'air le ^{14}C minéral est présent sous forme de gaz carbonique $^{14}\text{CO}_2$; dans l'eau, il est à l'état de carbonate ou de bicarbonate. La forme organique est notamment présente dans toutes les molécules carbonées constituant le vivant.

Dans les effluents gazeux des réacteurs à eau pressurisée (REP), la forme organique $^{14}\text{CH}_4$ (méthane) est majoritaire par rapport à la forme minérale ($^{14}\text{CO}_2$). Dans les rejets liquides, les formes chimiques du ^{14}C sont des carbonates ou des composés organiques indéterminés.

PROPRIÉTÉS NUCLÉAIRES ET DOSE EFFICACE

Le ^{14}C est un émetteur de rayonnement bêta de faible énergie avec une demi-vie de 5 730 ans. C'est un radionucléide de radiotoxicité modérée.

Doses efficaces liées à l'inhalation d'un becquerel de ^{14}C suivant ses différentes formes
(source : Directive Européenne 96/29/EURATOM)

FORME DU ^{14}C	DOSE EFFICACE (Sv/Bq) PAR INHALATION POUR UN ADULTE
Aérosols (1 μm)	$2,0 \cdot 10^{-9}$
Dioxyde de carbone	$6,2 \cdot 10^{-12}$
Monoxyde de carbone	$8,0 \cdot 10^{-13}$
Méthane	$2,9 \cdot 10^{-12}$

La voie prépondérante d'exposition pour le public est l'ingestion. La dose efficace (Sv/Bq) liée à l'ingestion pour un adulte est de $5,8 \cdot 10^{-10}$.

ORIGINES DU CARBONE 14 (^{14}C)LE ^{14}C D'ORIGINE 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. La production annuelle est d'environ $1,54 \cdot 10^{15}$ Bq. La variation des rayonnements cosmiques entraîne une fluctuation de cette production. L'activité à l'équilibre à l'échelle de la planète est d'environ $1,4 \cdot 10^{17}$ Bq.

LE ^{14}C D'ORIGINE ARTIFICIELLE

LES EXPLOSIONS NUCLÉAIRES ATMOSPHÉRIQUES

Les neutrons émis lors des explosions nucléaires interagissent avec l'azote de l'atmosphère pour former du ^{14}C . Les essais nucléaires atmosphériques dans l'hémisphère nord entre 1945 et 1980 ont introduit $4 \cdot 10^{17}$ Bq de ^{14}C dans l'atmosphère.

LES REJETS DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES ET L'IMPACT RADIOLOGIQUE ASSOCIÉ

Dans les réacteurs nucléaires du type REP, le ¹⁴C provient des réactions au niveau du combustible, des matériaux de structures du cœur et du modérateur (eau...). La production de ¹⁴C provient essentiellement de l'interaction des neutrons avec l'oxygène 17 (¹⁷O) et l'azote 14 (¹⁴N) présents dans l'eau du circuit primaire ainsi que de l'¹⁷O présent dans le combustible. Un réacteur REP de 1000 MWe génère en moyenne environ 2.10¹¹ Bq/an. Les rejets atmosphériques du ¹⁴C sont sous la forme de méthane (80%) et de dioxyde de carbone (20%). Les rejets liquides sont constitués de dioxyde de carbone dissous (carbonates).

Les rejets des CNPE du ¹⁴C dépendent de la puissance des réacteurs implantés sur chaque site (voir tableau ci-dessous)

A 1 km sous l'influence des rejets d'un CNPE, l'activité volumique de l'air en carbone 14 peut être en moyenne doublée par rapport au bruit de fond. Mais, seul le ¹⁴C présent sous forme de ¹⁴CO₂, qui ne représente que 20% des rejets gazeux, peut être assimilé par les végétaux lors de la photosynthèse. Il en résulte que l'activité de ¹⁴C ajoutée aux végétaux par les rejets d'un CNPE est très faible. Elle ne peut être quantifiée qu'au

moyen d'un indicateur très sensible : l'activité de ¹⁴C par unité de masse de carbone (Bq/kg de carbone). Cet indicateur permet de discerner les faibles influences du ¹⁴C autour des CNPE. Ainsi, entre 1 et 2 km, l'activité ajoutée du fait des rejets de ¹⁴C correspond en moyenne à une augmentation de 8 % (pouvant atteindre ponctuellement 20 %) du bruit de fond radiologique (¹⁴C naturel et rémanent des essais nucléaires) qui est actuellement de 227 Bq/kg de carbone.

Cette activité spécifique diminue en fonction de la distance du site, au-delà de 10 à 15 km elle correspond au bruit de fond radiologique.

La principale voie d'exposition pour la population associée aux rejets atmosphériques de ¹⁴C d'un CNPE est liée à la consommation de produits locaux. Dans un rayon de 5 km, la dose efficace pour un adulte est de 0,075 µSv/an. La dose efficace moyenne liée à la consommation de 5,3 kg/an de poissons d'eau douce marqués par le ¹⁴C des rejets liquides des CNPE correspond à 0,15 µSv/an, en moyenne.

La dose efficace par inhalation en bordure d'un CNPE est négligeable (environ 0,001 µSv/an).

Gamme des rejets atmosphériques réels pour la période 2014-2016 en fonction de la puissance totale des réacteurs implantés sur chaque site (source : IRSN - Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2015 à 2017)

CNPE	REJETS ATMOSPHÉRIQUES (MINIMUM ET MAXIMUM EN GBq/an)	REJETS LIQUIDES (MINIMUM ET MAXIMUM EN GBq/an)
Gravelines	830 - 1 130	51,3 - 67,3
Cattenom, Paluel	640 - 910	30,0 - 68,2
Bugey, Cruas, Chinon, Dampierre, Tricastin, Blayais	410 - 680	17,3 - 62,7
Civaux, Chooz	280 - 670	35,0 - 44,9
Belleville, Flamanville, Golfech, Nogent, Penly, Saint-Laurent	280 - 670	15,2 - 44,4
Fessenheim, Saint-Alban	200 - 350	9,0 - 22,8

LES REJETS DE L'USINE DE TRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USÉS ET L'IMPACT RADIOLOGIQUE ASSOCIÉ

Le ¹⁴C piégé dans les combustibles usés est libéré lors de l'étape de dissolution principalement sous la forme de CO₂. Ce dioxyde de carbone est en grande partie absorbé par des solutions sodiques qui sont ensuite diluées dans les effluents liquides.

En 2017, l'usine d'Orano Cycle de La Hague a

rejeté 16,6 TBq dans ses rejets gazeux et 7,33 TBq de ¹⁴C dans ses rejets liquides, ce qui représente respectivement 65 % et 92 % de l'activité totale de ¹⁴C rejetée annuellement par l'ensemble de l'industrie nucléaire française.

L'influence des rejets du site d'Orano Cycle La Hague, sous la forme liquide et gazeuse (CO₂), est mesurable dans la plupart des compartiments de l'environnement.

La dose efficace par inhalation pour la population vivant dans les communes autour de l'usine est inférieure à 0,002 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

L'évaluation de la dose efficace due au ^{14}C à partir des mesures pour la population résidant à proximité de l'usine de la Hague varie en fonction de la quantité de denrées locales consommée : 2,5 μSv pour un pêcheur, 2,9 μSv pour un agriculteur et 0,4 μSv pour un habitant vivant à proximité du site et consommant les denrées locales.

LES REJETS DE ^{14}C ET LES IMPACTS RADIOLOGIQUES ASSOCIÉS POUR LES AUTRES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

Le site de Marcoule héberge une vingtaine d'Installations Nucléaires de Base (INB) et d'Installations Nucléaires de Base Secrète (INBS); certaines sont en cours de démantèlement. En 2017, l'INB ATALANTE a rejeté 0,25 GBq ; les rejets liquides de ces installations sont traités dans la même unité (STEL) et représentent une activité rejetée de 1,96 GBq.

L'activité spécifique du ^{14}C mesurée dans les feuilles d'arbres 240 Bq/kg de carbone est très proche de la valeur du bruit de fond (227 Bq/kg de carbone). Dans les denrées consommées l'activité du ^{14}C n'est pas discernable du bruit de fond.

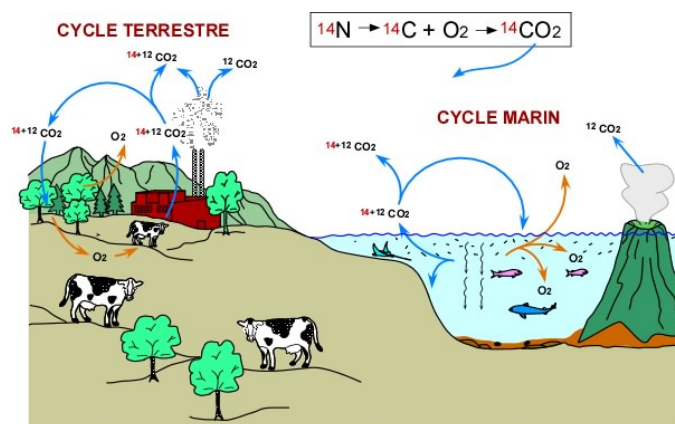
Le site de Saclay héberge plusieurs réacteurs, un irradiateur et une entreprise pour la fabrication de produits utilisés en médecine nucléaire. En 2017, les rejets gazeux et liquides de ^{14}C ont été de 58 GBq et 0,081 GBq, respectivement. L'impact maximal

calculé par modélisation à partir des rejets de ^{14}C pour l'année 2017 serait environ 0,24 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Le site de Cadarache regroupe un nombre important d'INB (21) et d'ICPE (24). En 2017, les rejets gazeux de ^{14}C pour l'ensemble des INB représentent 1,15 GBq, contre 0,002 GBq pour les rejets liquides.

L'institut Laue-Langevin à Grenoble est un organisme de recherche international en sciences et techniques neutroniques. Les rejets de ^{14}C en 2017 sous forme gazeuse et liquide sont respectivement de 0,046 TBq et 0,29 GBq.

Le site de l'ANDRA de l'Aube (CSA) en 2017 a rejeté 52 MBq et 0,19 MBq de ^{14}C respectivement dans ses effluents gazeux et liquides.



Le cycle du carbone 12 et du carbone 14
(source : © P-A Bourgue - site)

L'impact du ^{14}C dans les différentes installations nucléaires varie en fonction des habitudes alimentaires, de l'activité des rejets, de la forme des rejets (gazeuse ou liquide) et du milieu dans lesquels s'effectuent ces rejets.

L'usine de traitement des combustibles usés est l'installation dont l'activité du ^{14}C dans les rejets est la plus importante. Les agriculteurs et les pêcheurs du fait de leur consommation plus importante de denrées provenant de leurs productions recevraient une dose efficace inférieure à 3 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Concernant les rejets de chaque centrale nucléaire, l'impact est inférieur à 0,2 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ pour les centrales qui rejettent dans les fleuves.

Ces doses efficaces dues au ^{14}C pour les différentes installations nucléaires sont à comparer à la dose moyenne de 2 900 μSv due à la radioactivité naturelle reçue par la population française.

L'impact radiologique du ^{14}C reste faible pour les installations nucléaires françaises.

