



FICHE RADIONUCLÉIDE

Carbone 14 et environnement

Cette fiche résume le comportement de l'élément chimique dans les principaux compartiments des écosystèmes terrestres et aquatiques, sous les deux hypothèses suivantes. La discrimination isotopique est négligeable, ce qui est vérifié pour la plupart des éléments traités. Lorsque l'élément possède des isotopes stables, l'analogie de comportement entre ses isotopes stables et radioactifs est admise implicitement, sachant toutefois que pour les éléments existant à l'état naturel, la forme chimique et le milieu d'émission des rejets anthropiques sont susceptibles d'impliquer des voies et processus de transfert autres que ceux identifiés pour l'élément stable naturel.

Le ou les isotopes radioactifs désignés dans l'intitulé de la fiche correspondent aux radionucléides d'importance radioécologique majeure, au sens des quantités et de la rémanence dans l'environnement, d'autres isotopes, radioactifs ou stables, pouvant être cités à titre complémentaire. Les informations, volontairement simplifiées, sont destinées à refléter l'état des connaissances sur le sujet à la date de mise à jour et à proposer des valeurs pour les principaux paramètres radioécologiques usuels permettant une estimation des transferts dans l'environnement et plus particulièrement au sein de la chaîne alimentaire.

Rédaction : J. Garnier-Laplace, S. Roussel-Debet

Vérification : C. Mourlon

Date de rédaction : 01/08/01

Caractéristiques

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, 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.

Le ^{14}C peut exister sous d'autres formes. Ainsi, dans les effluents gazeux des réacteurs à eau bouillante, le ^{14}C est à 95 % sous forme de 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}C se trouve sous forme organique (notamment de CH_4) contre 20 % sous forme de 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.

Nucléaires

	^{14}C
Période radioactive	5 733,9 ans
Activité massique	$1,6485 \times 10^{11} \text{ Bq.g}^{-1}$
Émission(s) principale(s) par désintégration (rendement d'émission %)	β^- $E_{\text{max}} = 156,5 \text{ keV}$ (100 %)

(ICRP, 1983 ; Browne et Firestone, 1986)

Origines

Naturelle

Le ^{14}C naturel résulte de l'action des neutrons cosmiques sur les atomes d'azote dans stratosphère et dans la partie supérieure de la troposphère. Le taux de production annuel est d'environ $1,54 \times 10^{15}$ Bq et la réserve atmosphérique de ^{14}C à l'équilibre est d'environ $1,27 \times 10^{19}$ 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).

Artificielle

Retombées des 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 $2,1 \times 10^{17}$ Bq de ^{14}C .

Rejets des réacteurs nucléaires

Dans les réacteurs nucléaires, la production de ^{14}C provient de réactions dans le combustible, les matériaux de structure du cœur et le modérateur. Un réacteur à eau légère de 1 000 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 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}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 est 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. Les rejets gazeux de ces usines ont été estimés à $1,87 \times 10^{13}$ Bq en 1999. Les rejets liquides de l'usine de La Hague en 1999 ont été de $9,9 \times 10^{12}$ Bq.

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

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 la production annuelle de ^{14}C à 3×10^{10} Bq par million d'habitants dans les pays développés et à 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 (UNSCEAR, 1993).

Concentrations dans l'environnement et métrologie

Constituant majeur de la matière vivante, le carbone est présent dans l'écorce terrestre à la concentration de 200 ppm. La proportion de carbone dans la matière sèche des végétaux terrestres ou aquatiques est en moyenne de 49 % (teneurs en carbone des glucides : 44 %, protéines : 50 % et lipides : 76 %). Chez les animaux terrestres ou aquatiques, elle varie de 10 à 40 % (OMS, 1987).

L'activité spécifique de l'atmosphère ($^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$), qui a augmenté dans les années 1960 avec les essais atmosphériques nucléaires, décroît lentement depuis les années 1965 du fait de l'arrêt de ces essais et de l'augmentation simultanée des émissions de CO_2 . Des mesures effectuées sur des productions agricoles non influencées par des rejets au Royaume Uni, indiquent que l'activité spécifique serait, en 1992, de l'ordre de 0,26 Bq de ^{14}C par g de carbone stable (McCartney *et al.*, 1988 ; Sundquist, 1993 ; Otlet *et al.*, 1997).

Pour la mesure du ^{14}C , la scintillation liquide est la technique la plus utilisée. Diverses réactions chimiques de transformation du carbone de l'échantillon peuvent être exploitées : mise sous forme de carbonate de calcium, gaz carbonique, puis acétylène puis benzène.

Mobilité et biodisponibilité en milieu terrestre

Les données relatives au ^{14}C et les modèles de devenir dans les milieux terrestres de ce radionucléide (Scott *et al.*, 1991 ; Scheppard *et al.*, 1994 ; Garnier-Laplace *et al.*, 1998) sont fondés sur les connaissances relatives au cycle du carbone, à l'équilibre (Ouyang *et al.*, 1992).

Le ^{14}C est intégré dans le cycle du carbone, lui-même très complexe en raison de la présence de carbone minéral et organique, sous forme solide, liquide ou gazeuse (Figure 1).

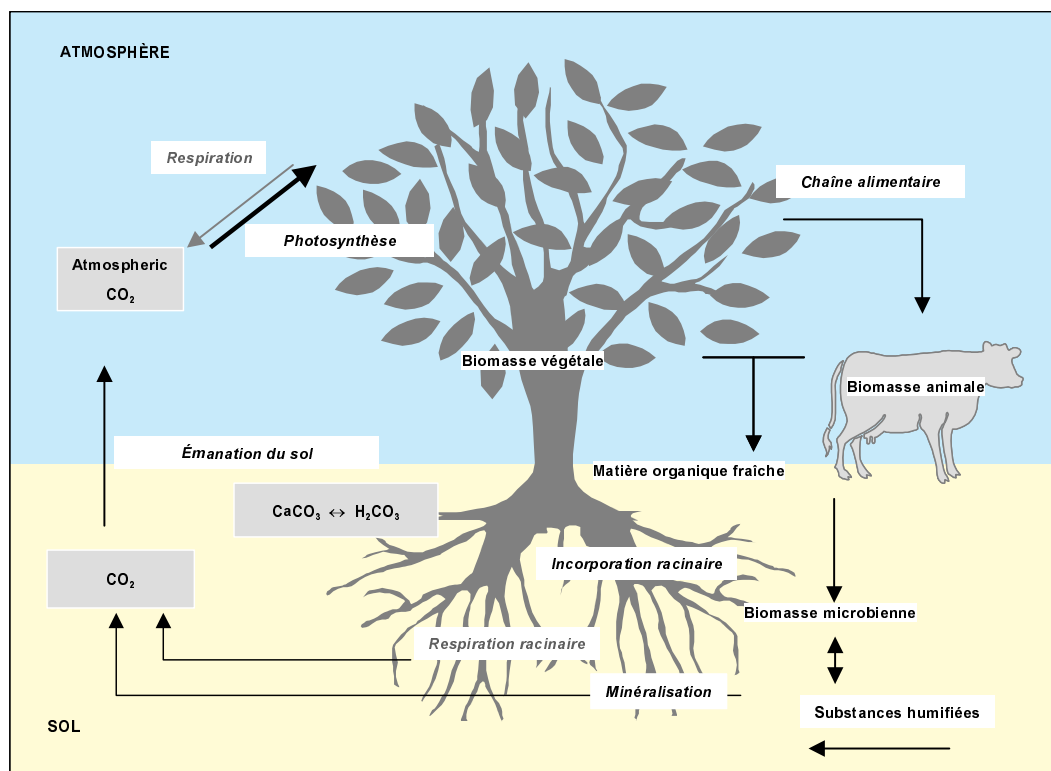
Sols

La teneur moyenne en carbone dans la matière organique des sols cultivés en France est d'environ 20 g de carbone par kg de sol sec. Le carbone dans la solution du sol peut être sous forme de CO_2 , de carbonate CO_3^{2-} ou de bicarbonate HCO_3^- , en fonction du pH et de la teneur en ions calcium.

Végétaux

L'absorption racinaire du carbone par les végétaux est négligeable. L'incorporation racinaire à partir des ions carbonates, mal connue, représenterait 5 % au plus du carbone total incorporé dans le végétal. La teneur moyenne en CO_2 de la phase gazeuse des sols varie de 0,5 % à 1 % et elle augmente avec la présence de plantes (du fait de la respiration racinaire, le pH diminue et le CO_2 dissous augmente à raison d'environ 38 % par unité de pH).

Le carbone est incorporé majoritairement par assimilation foliaire du CO_2 lors de la photosynthèse. La discrimination isotopique qui dépend du cycle photosynthétique du végétal est négligeable (rapport $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ inférieur de 5 %, au maximum, entre le végétal et le CO_2 atmosphérique).



L'émanation de CO₂, provenant de la minéralisation des résidus organiques du sol et de la respiration des racines, tend à accroître la concentration du CO₂ dans l'air, au niveau du couvert végétal. Le flux journalier de CO₂ dégagé par le sol serait de 2 g à 13 g de CO₂ par m². Il participerait pour environ 10 % à l'incorporation du carbone total assimilé par les feuilles lors de la photosynthèse.

Figure 1 : Schéma du cycle du carbone dans les systèmes sol –plante-animaux.

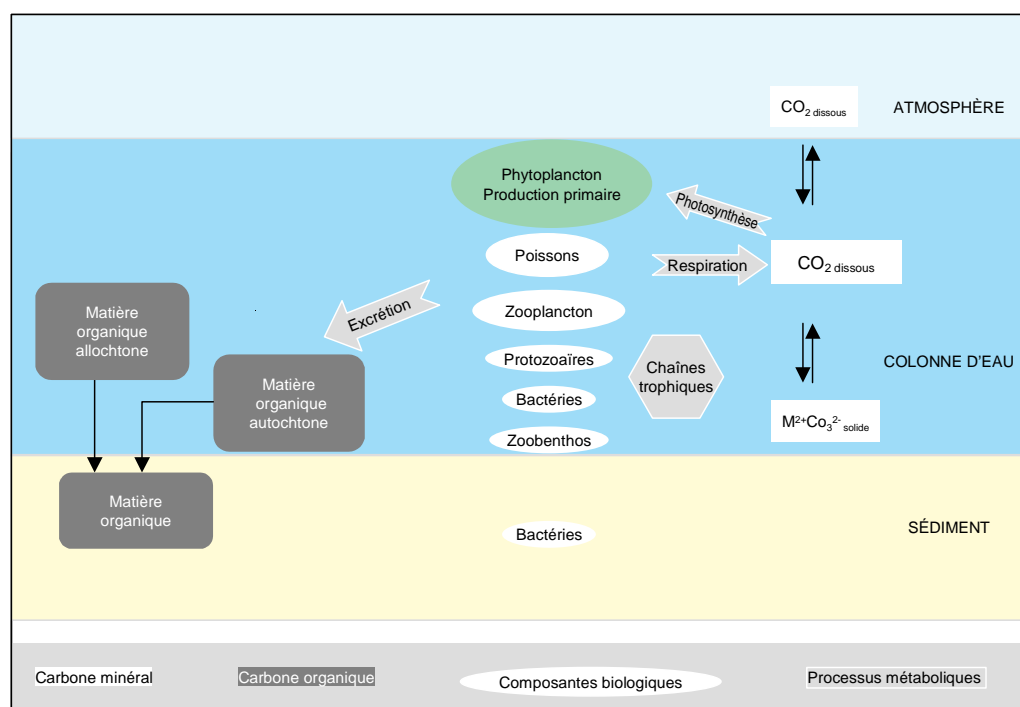
Animaux

Plus de 99 % du carbone incorporé par l'animal d'élevage provient de l'ingestion des aliments qui composent sa ration. L'apport de carbone par inhalation est négligeable de même que celui provenant de l'ingestion d'eau ou de sol.

Mobilité et biodisponibilité dans les écosystèmes dulçaquicoles

Les données relatives au ^{14}C et les modèles de devenir dans les milieux aquatiques continentaux de ce radionucléide (Scheppard *et al.*, 1994 ; Garnier-Laplace *et al.*, 1998) sont fondés sur les connaissances relatives au cycle du carbone, à l'équilibre (Stumm et Morgan, 1981 ; Amoros et Petts, 1993).

Les composés organiques de ^{14}C rejetés par les installations nucléaires s'incorporent au carbone organique de l'hydrosystème récepteur (Figure 2).



Le carbone minéral rejeté par les installations nucléaires ou présent dans l'hydrosystème apparaît sous la forme des éléments du système des carbonates ($\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$) qui est l'un des systèmes chimiques principaux intervenant dans le contrôle du pH en eaux douces. Dans la plupart des eaux courantes, le pH varie de 6 à 9, avec dominance des formes bicarbonates. Le ^{14}C des effluents liquides, rejeté sous forme de carbonates, est incorporé au carbone minéral. La dilution isotopique varie en fonction des échanges avec l'atmosphère, des apports par ruissellement et des échanges avec les systèmes hydrogéologiques. Dans tous les cas, l'activité spécifique du ^{14}C minéral doit être rapportée à la valeur mesurée *in situ* pour le CO_2 total : $[\text{CO}_2]_{\text{total}} = [\text{CO}_2]_{\text{liq}} + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$.

Figure 2 : Schéma du cycle du carbone dans les hydrosystèmes d'eau douce.

Eaux et sédiments

Le ^{14}C est intégré dans le cycle du carbone des hydrosystèmes continentaux, où les principales formes se répartissent entre carbone organique (carbone organique dissous, COD, de 1 mg à 3 mg de carbone par litre, et carbone particulaire très variable d'un hydrosystème à l'autre) et carbone minéral (essentiellement sous la forme de bicarbonates dissous, de 1 mg à 120 mg de carbone par litre). Acides humiques et fulviques représentent de 50 % à 75 % du COD et les formes colloïdales 20 %. Les formes particulières sont également variées : formes détritiques allochtones, organismes vivants et composés issus de leur dégradation.

Végétaux

Les transferts aux végétaux sont gouvernés par la photosynthèse. La photosynthèse, assurée principalement par les végétaux supérieurs, les algues périphtiques et planctoniques, et les cyanobactéries peut, schématiquement, être considérée comme le processus biologique dominant influençant la concentration en carbone minéral de l'hydrosystème, la respiration des organismes et la fermentation bactérienne pouvant être négligées. La concentration en carbone total des végétaux d'eau douce est en moyenne de 5×10^4 mg de carbone par kilogramme frais.

Animaux

Les transferts aux animaux sont gouvernés par l'ingestion. Pour les organismes aquatiques, les processus de respiration et d'osmorégulation qui utilisent le carbone minéral sont également négligeables devant les transferts de carbone organique *via* l'ingestion de nourriture dans le bilan carboné de l'animal. La concentration du carbone chez les animaux varie d'une espèce à l'autre.

En résumé ...

Le ^{14}C a la particularité d'être un radio-isotope du carbone, élément entrant dans la constitution de la matière vivante.

Pour l'évaluation de l'impact des rejets chroniques, un consensus général considère que le ^{14}C a le même comportement que l'isotope stable ^{12}C (qui représente 99 % du carbone). L'évaluation des transferts de ^{14}C entre deux compartiments de l'environnement est fondée sur l'hypothèse de conservation du rapport isotopique entre le carbone radioactif et le carbone stable, ce qui suppose implicitement la mise à l'équilibre du carbone 14 dans la biosphère. Avec cette hypothèse, les évaluations d'impact sur l'environnement et les populations ne peuvent être réalisées que pour des rejets et des concentrations dans l'environnement constants au cours du temps, en général à partir de valeurs moyennes annuelles.

Modèles radioécologiques usuels (à l'équilibre) : milieu terrestre

Au cours de la photosynthèse, le CO₂ 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.

Sols

Le transfert atmosphère → végétaux est modélisé en supposant que l'activité spécifique (Bq de ¹⁴C par kg de ¹²C) du carbone des végétaux est la même que celle de l'atmosphère, ce qui sous-entend que le transfert du ¹⁴C, radionucléide trace, est identique à celui du ¹²C et que l'équilibre entre les deux compartiments est réalisé.

${}^{14}\text{C}_v = \frac{{}^{14}\text{C}_{\text{air}_{\text{min}}}}{{}^{12}\text{C}_{\text{air}_{\text{CO}_2}}} \cdot f_v$	
¹⁴ C _v	activité massique du végétal frais (Bq kg ⁻¹ végétal frais)
¹² C _{air_{CO2}}	masse de carbone sous forme de CO ₂ par unité de volume d'air (kg de C.m ⁻³ d'air) ≈ 0,19.10 ⁻³
¹⁴ C _{air_{min}}	activité volumique du ¹⁴ C sous forme minérale dans l'air (Bq de ¹⁴ C.m ⁻³ d'air)
f _v	proportion de carbone du végétal (kg de C. kg ⁻¹ végétal frais)

Végétaux

Le transfert eau d'irrigation → végétaux est modélisé en supposant que l'apport de ^{14}C par irrigation est incorporé *via* la photosynthèse, du fait de l'émanation de CO_2 issu du sol. L'activité massique du végétal est évaluée en considérant les flux de ^{12}C et de ^{14}C émanant du sol, et la fraction du flux carboné qui provient du sol et qui participe à la photosynthèse.

$^{14}\text{C}_v = \frac{^{14}\text{C}_{\text{eau}} \cdot T_{\text{eau}}}{\phi^{12}\text{C}} \cdot f \cdot f_v$	
$^{14}\text{C}_v$	activité massique du végétal frais (Bq.kg^{-1} végétal frais)
$^{14}\text{C}_{\text{eau}}$	activité volumique de l'eau d'irrigation (Bq.m^{-3})
$\phi^{12}\text{C}$	flux de carbone sous forme de CO_2 , provenant du sol ($\text{kg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) $\approx 0,5$
T_{eau}	hauteur d'eau d'irrigation ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) ; <i>estimation</i> $\approx 0,5$
f_v	proportion de carbone du végétal (kg de C kg^{-1} végétal frais)
f	fraction du flux carboné provenant du sol, participant à la photosynthèse $\approx 0,1$

Animaux

Le transfert aux produits animaux est modélisé en fonction de la voie de transfert (voie atmosphérique et/ou voie liquide de contamination des végétaux constituant la ration alimentaire) selon les expressions respectives :

${}^{14}\text{C}_c = \frac{{}^{14}\text{C}_{\text{air}_{\text{min}}}}{{}^{12}\text{C}_{\text{air}_{\text{CO}_2}}} \cdot f_c \qquad {}^{14}\text{C}_c = \frac{{}^{14}\text{C}_{\text{eau}} \cdot T_{\text{eau}}}{\varphi^{12}\text{C}} \cdot f \cdot f_c$	
${}^{14}\text{C}_c$	activité massique ou volumique du produit frais ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{frais}}$ ou $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}_{\text{frais}}$)
${}^{12}\text{C}_{\text{air}_{\text{CO}_2}}$	masse de carbone sous forme de CO_2 par unité de volume d'air (kg de carbone $\cdot \text{m}^{-3}$ d'air) $\approx 0,19 \cdot 10^{-3}$
${}^{14}\text{C}_{\text{air}_{\text{min}}}$	activité volumique du ${}^{14}\text{C}$ sous forme minérale dans l'air (Bq de ${}^{14}\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$ d'air)
${}^{14}\text{C}_{\text{eau}}$	activité volumique de l'eau d'irrigation ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)
$\varphi^{12}\text{C}$	flux de carbone sous forme de CO_2 , provenant du sol ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) $\approx 0,5$
T_{eau}	hauteur d'eau d'irrigation ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$) ; estimation $\approx 0,5$
f	fraction du flux carboné provenant du sol, participant à la photosynthèse $\approx 0,1$
f_c	proportion de carbone du produit d'origine animale (kg de $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{frais}}$)

Proportion de carbone dans les végétaux et les produits d'origine animale (kg de carbone par kg frais)

Herbe ou fourrage vert	0,160
Foin	0,330
Légumes feuilles	0,035
Autres légumes	0,072
Fruits	0,065
Céréales	0,360
Sucre	0,438
Huile	0,750
Lait et produits laitiers frais	0,067
Beurre	0,620
Fromage	0,350
Oeufs	0,156
Viande de bœuf	0,228
Viande de porc	0,402
Viande de poulet	0,156
Viande de mouton	0,289

(Garnier-Laplace *et al.*, 1998)

Modèles radioécologiques usuels (à l'équilibre) : eaux douces

Eaux et sédiments

Pour l'eau potable, la concentration de ^{14}C est supposée égale à la concentration de l'eau du cours d'eau ou du puits d'origine, éventuellement corrigée d'un facteur lié au traitement appliqué. L'efficacité de la filière de potabilisation sur l'élimination du ^{14}C de l'eau de distribution n'a pas été étudiée.

Les sédiments sont rarement pris en compte dans les modèles de calcul des doses dues au ^{14}C . Le calcul de la fraction du polluant liée à la phase dissoute peut cependant être réalisé sur la base d'une valeur de K_d de $2 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \text{ sec}$.

Végétaux

L'équation pour le phytoplancton et les végétaux immergés est la suivante :

$^{14}\text{C}_{va} = \frac{^{14}\text{C}_{\text{min}_{\text{eau}}}}{^{12}\text{C}_{\text{min}_{\text{eau}}}} f_{c_{va}}$	
$^{14}\text{C}_{va}$	Activité massique du carbone 14 dans le végétal aquatique ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ frais)
$^{14}\text{C}_{\text{min}_{\text{eau}}}$	Activité volumique du carbone 14 minéral total de l'eau du cours d'eau récepteur ($\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$)
$f_{c_{va}}$	Proportion de carbone dans le végétal sur la base du poids sec ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ sec)
$^{12}\text{C}_{\text{min}_{\text{eau}}}$	Concentration en carbone minéral total de l'eau du cours d'eau (kg de $\text{C} \cdot \text{l}^{-1}$)
	$^{12}\text{C}_{\text{min}_{\text{eau}}} = [\text{CO}_2]_{\text{total}} = [\text{CO}_2]_{\text{aq}} + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$

Animaux

Pour les poissons (ou autres animaux), les formes chimiques rejetées, minérales (proportion p_m dans les effluents liquides) ou organiques ($p_o = 1-p_m$) peuvent être prises en compte dans l'évaluation des transferts. En raison de la lenteur des transformations des formes organiques en formes minérales, le carbone 14 présent à l'équilibre sous formes minérales dans l'eau du cours d'eau provient uniquement des apports des rejets liquides, dont une partie a été utilisée par la photosynthèse : elle est présente dans une proportion inférieure à p_m et l'expression $C_{\text{min eau}} = p_m \cdot C_{\text{eau}}$ peut être considérée comme un majorant.

Pour les formes organiques, le bilan à l'équilibre est plus complexe, du fait de la concurrence entre deux effets. D'une part, l'intégration des formes organiques du carbone 14 de l'eau du cours d'eau par la boucle microbienne tend à rendre sa proportion inférieure à p_o , et d'autre part, l'apport des bris de proies contaminées et d'excréments d'organismes contaminés tend à rendre sa proportion supérieure à p_o . L'expression ci-après n'est donc qu'une approximation de l'activité du carbone 14 sous formes organiques dans l'eau d'un cours d'eau : $C_{\text{org eau}} = p_o \cdot C_{\text{eau}}$. Avec ces hypothèses, l'expression suivante est retenue en première approximation :

$${}^{14}\text{C}_{\text{poisson}} = f_{\text{c poisson}} \cdot {}^{14}\text{C}_{\text{eau}} \cdot \text{Max} \left(\frac{(1 - p_m)}{{}^{12}\text{C}_{\text{org eau}}}, \frac{p_{m_u}}{{}^{12}\text{C}_{\text{min eau}}} \right)$$

${}^{14}\text{C}_{\text{poisson}}$	Activité massique du carbone 14 dans le poisson (Bq.kg ⁻¹ frais)
$f_{\text{c poisson}}$	Proportion de carbone stable du poisson (kg C.kg ⁻¹ frais)
${}^{14}\text{C}_{\text{eau}}$	Activité volumique du carbone 14 dans l'eau du cours d'eau (généralement filtrée à 0,45 µm) due aux rejets (Bq.l ⁻¹)
p_m	Proportion de carbone 14 rejetée sous formes minérales (s.d.)
${}^{12}\text{C}_{\text{org eau}}$	Concentration du carbone stable dans l'eau du cours d'eau sous formes organiques (kg.l ⁻¹)
${}^{12}\text{C}_{\text{min eau}}$	Concentration du carbone stable dans l'eau du cours d'eau sous formes minérales (kg.l ⁻¹)

Proportion de carbone stable dans les végétaux et les animaux aquatiques (kg de C. kg⁻¹ frais)

Producteurs primaires

Phytoplancton	<i>Scenedesmus</i> (chlorophycée)	0,060
	<i>Chlorella</i> (chlorophycée)	0,119
	<i>Cyclotella</i> (diatomée)	0,088
Végétaux immergés	En général	0,048
	<i>Myriophyllum sp.</i>	0,048
	<i>Ceratophyllum sp.</i>	0,061
Zooplancton, benthique	macrofaune	
	Daphnie	0,038
	Larves d'insecte	0,060
	Zooplancton divers	0,035

Poissons

Brème	0,031
Carpe	0,015
Chevesne, Gardon Truite fario Brochet,	0,030
Truite arc-en-ciel	0,038

(Garnier-Laplace *et al.*, 1998)

Bibliographie succincte

Amoros C et Petts GE (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*. Collection d'écologie, Masson, Paris.

Garnier-Laplace J, Roussel-Debet S et Calmon P (1998). *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.

McCartney M, Baxter MS et Scott EM (1988). Carbon-14 discharges from the nuclear fuel cycle : 1. Global effects. *J Environ Radioactiv*, 8: 143-155.

O.M.S. (1987). *Critères d'hygiène de l'environnement. Quelques radionucléides : Tritium, carbone 14, krypton 85, strontium 90, iode, césium 137, radon, plutonium*. Organisation Mondiale de la Santé, Genève.

Otlet RL, Walker AJ, Fulker MJ et Collins C(1997) Background Carbon - 14 levels in UK foodstuffs, 1981 - 1995, based upon a 1992 survey. *J Environ Radioactiv*, 34(1): 91-101.

Ouyang Y et Boersma L (1992). Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere. *Soil Science Soc Am J*, 56: 1695-1710.

Scott EM, Baxter MS et McCartney M (1991). *Considerations on the modelling of environmental radiocarbon*. BIOMOVs. Symposium on the validity of environmental transfer models. Stockholm (Sweden). SSI. 498 Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm (Sweden), pp. 107-123.

Sheppard S.C., Amiro B.D., Sheppard M.I., Stephenson M., Zach R., Bird G.A. (1994). Carbon-14 in the biosphere: Modeling and porting research for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management program, *Waste-Management*, 14 (5) 445-456

Stumm W et Morgan JJ (1981). *Aquatic Chemistry*. John Wiley, New-York.

Sundquist E (1993). The global carbon dioxide budget. *Science*, 259: 936-961.