

Origine du carbone 14 rejeté dans l'atmosphère

- Les centrales nucléaires électrogènes
- Les usines de retraitement des déchets nucléaires
- Les centres de stockage des déchets nucléaires
- Marquage des molécules pour la recherche, l'industrie et la médecine

Nature chimique du carbone 14 dans les rejets atmosphériques

- ❑ Minérale:
dioxyde de carbone (CO_2) et ses formes aqueuses (H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-})
monoxyde de carbone (CO)

- ❑ Organique: sous forme d'hydrocarbures légers tel le méthane (CH_4)

Devenir du carbone 14 des rejets atmosphériques

- ❑ Le monoxyde de carbone est progressivement oxydé en dioxyde de carbone par la biomasse microbienne du sol.

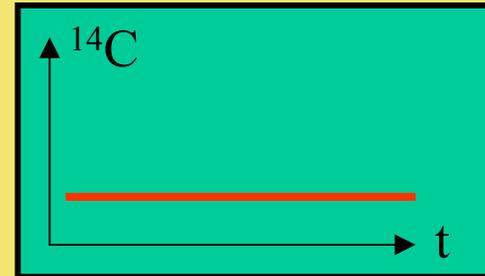
- ❑ Les hydrocarbures légers (essentiellement le méthane) vont être oxydés en dioxyde de carbone par:
 - ✓ réaction photochimique lente avec les radicaux libres hydroxyles dans l'atmosphère (temps de résidence du $\text{CH}_4 = 100$ ans)

 - ✓ dégradation microbienne dans le sol (incorporation dans le pool des molécules organiques simples)

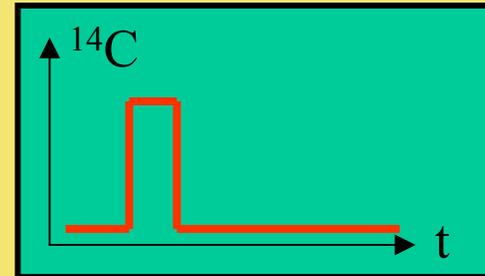
Scénario de rejet de carbone 14 dans l'atmosphère

Deux scénarii de rejet atmosphérique vont être étudiés:

Émission continue de carbone 14



Émission accidentelle de carbone 14

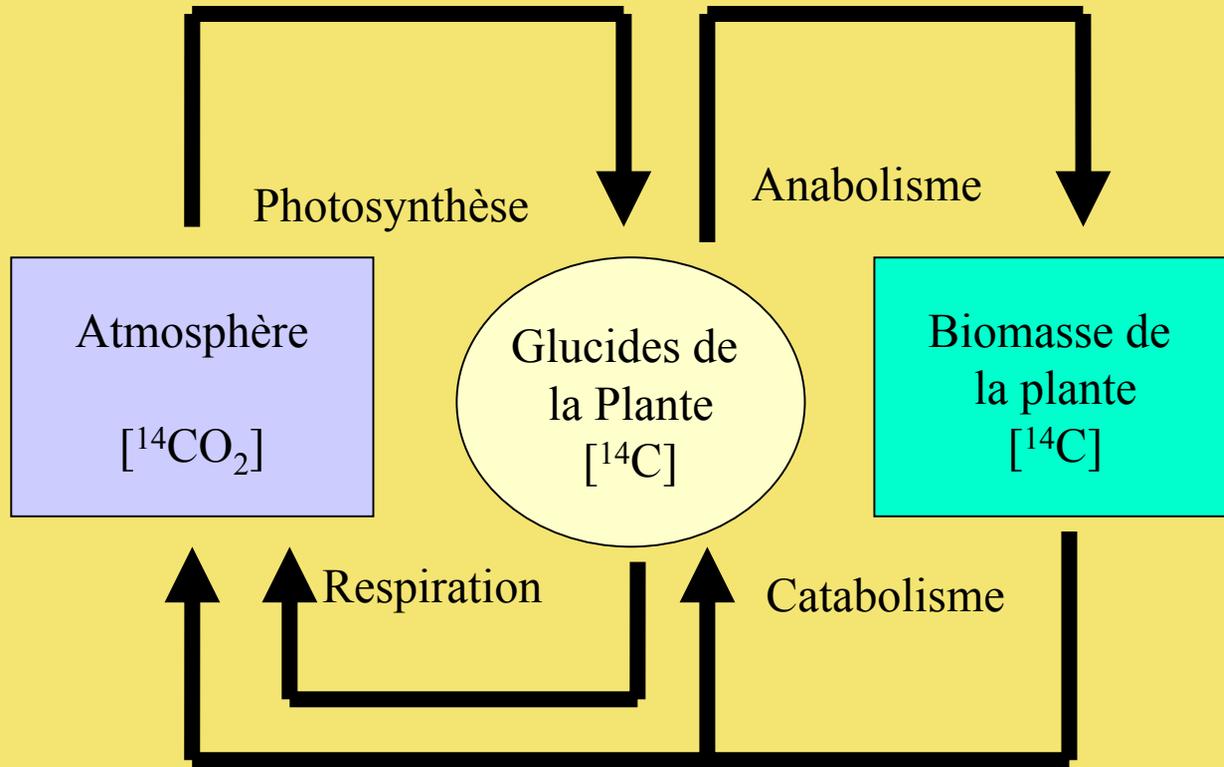


Dans chaque scénario, on se placera dans le cas le plus défavorable.

La modélisation va concerner la chaîne alimentaire de l'homme, de la plante à l'homme via les animaux. On étudiera successivement:

- La plante et les produits végétaux,**
- Le sol,**
- Les animaux et les produits animaux,**
- L'homme.**

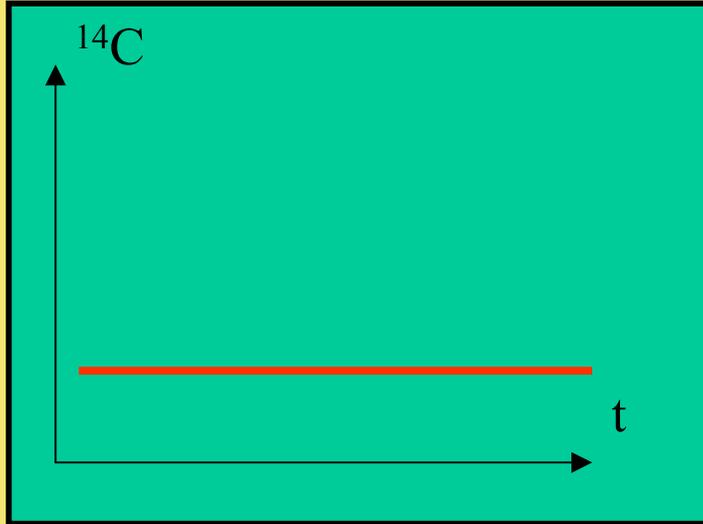
PLANTE



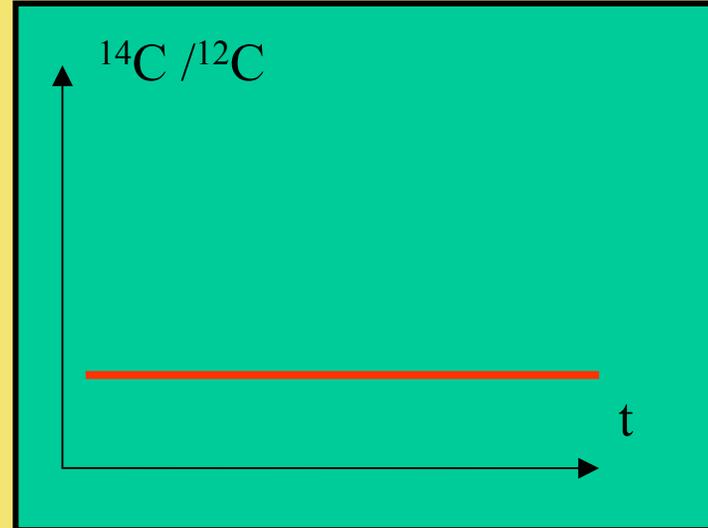
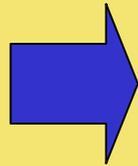
Circuit simplifié du carbone dans la plante

Émission continue de carbone 14

PLANTE



**Quantité de carbone 14
émise au point de rejet**



**Rapport isotopique de l'air a
une distance X du rejet**

Émission continue de carbone 14

PLANTE

$$[C14]_v = \frac{[C14CO_2]_{air}}{[C12CO_2]_{air}} \cdot f_c$$

$[C14]_v$ Activité massique du végétal frais (Bq.kg⁻¹)

f_c Proportion de carbone du végétal frais (paramètre sans unité, kg carbone. kg⁻¹ végétal frais)

$[C12CO_2]_{air}$ Masse de carbone sous forme de CO₂ par unité de volume d'air (kg.m⁻³)

$[C14CO_2]_{air}$ Activité volumique du carbone 14 de l'air sous forme de CO₂ (Bq.m⁻³)

*Émission continue de carbone 14**PLANTE*

$$[C14CO_2]_{air} = [C14]_{air} \cdot F_m$$

$[C14CO_2]_{air}$	Activité volumique du carbone 14 de l'air sous forme de CO ₂ (Bq.m ⁻³)
F_m	Proportion de carbone de l'air sous forme minérale (paramètre sans unité)
$[C14]_{air}$	Activité volumique du carbone 14 de l'air (Bq.m ⁻³)

Émission continue de carbone 14

PLANTE

$$[C14]_v = \frac{[C14]_{air}}{[C12CO2]_{air}} \cdot f_c \cdot F_m$$

$[C14]_v$ Activité massique du végétal frais (Bq.kg⁻¹)

f_c Proportion de carbone du végétal frais (paramètre sans unité)

$[C12CO2]_{air}$ Masse de carbone sous forme de CO₂ par unité de volume d'air (kg.m⁻³)

F_m Proportion de carbone de l'air sous forme minérale (paramètre sans unité)

$[C14]_{air}$ Activité volumique du carbone 14 de l'air (Bq.m⁻³)

Émission continue de carbone 14

PLANTE

$$[C14]_v = 5100 \cdot f_c \cdot F_m \cdot [C14]_{air} \cdot \frac{\Delta M}{M_{Tot.}}$$

$[C14]_v$ Activité massique du végétal frais (Bq.kg⁻¹)

f_c Proportion de carbone du végétal frais (paramètre sans unité)

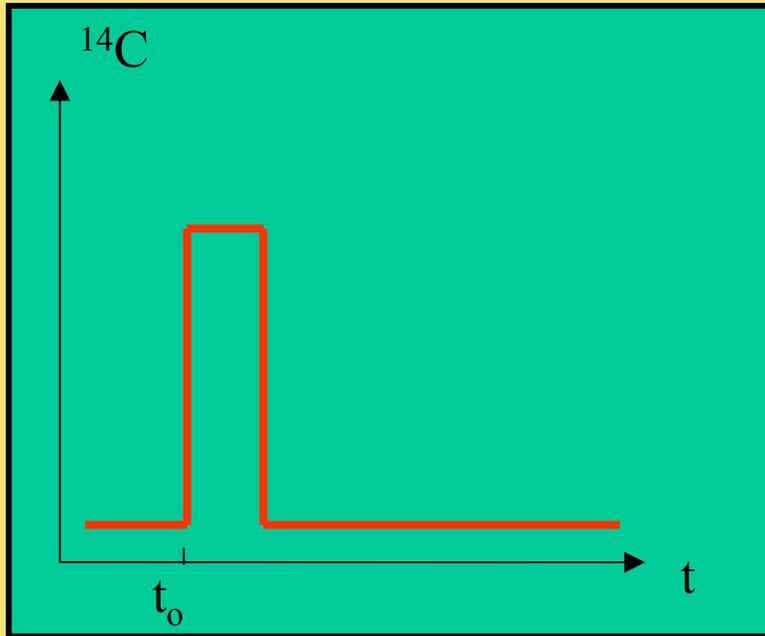
F_m Proportion de carbone de l'air sous forme minérale (paramètre sans unité)

$[C14]_{air}$ Activité volumique du carbone 14 de l'air (Bq.m⁻³)

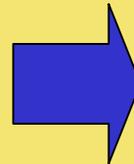
ΔM Quantité de biomasse produite depuis le début du rejet (kg)

$M_{Tot.}$ Quantité totale de biomasse produite pendant la croissance (kg)

Émission accidentelle de carbone 14

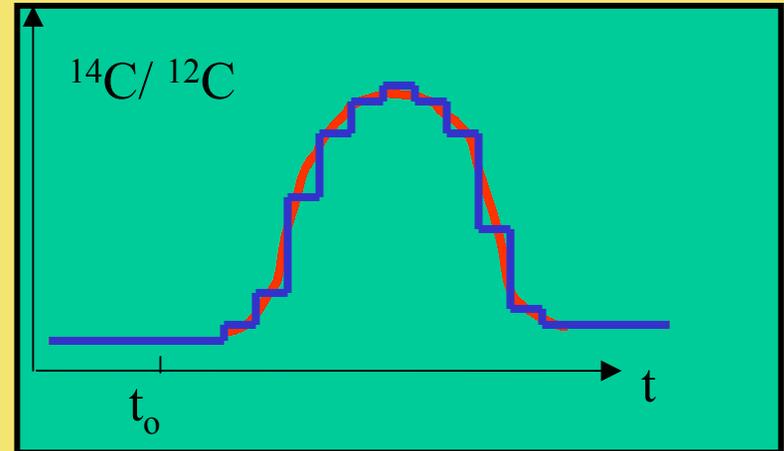
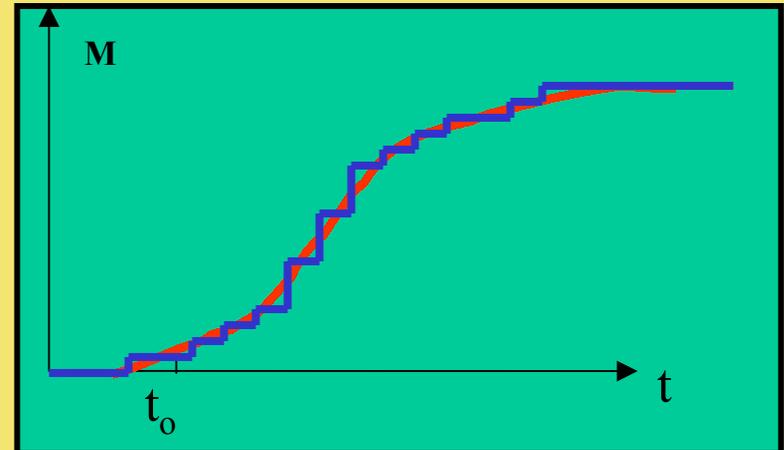


**Quantité de carbone 14
émise au point de rejet**



PLANTE

Courbe de croissance de la plante



**Rapport isotopique de l'air a une
distance X du rejet**

Émission accidentelle de carbone 14

PLANTE

$$[C_{14}]_v = \frac{\sum_{i=1}^N 5100 \cdot f_c \cdot F_m \cdot [C_{14}]_{air}^i \cdot \Delta M_i}{\sum_{i=1}^N \Delta M_i}$$

$[C_{14}]_v$ Activité massique du végétal frais (Bq.kg⁻¹)

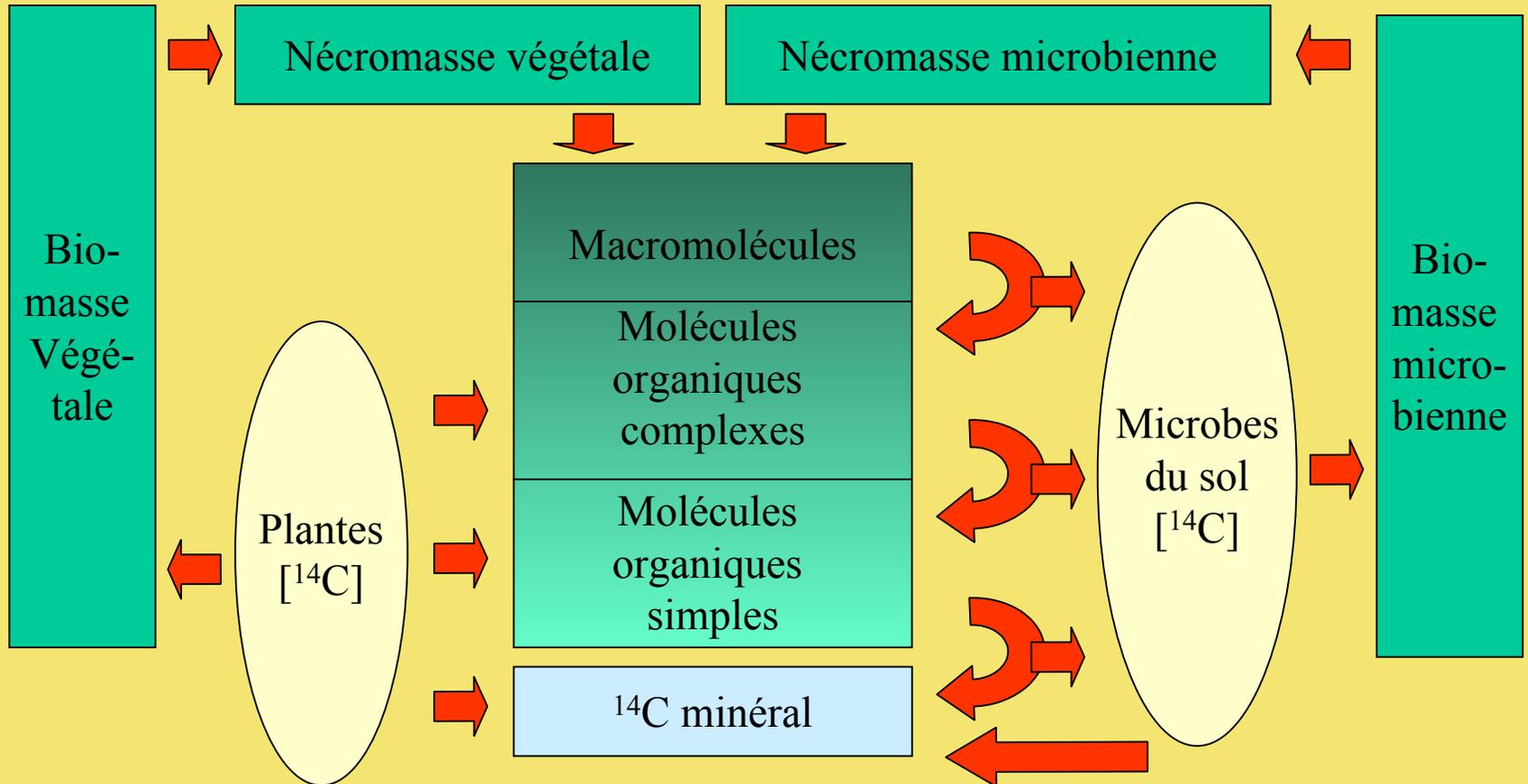
f_c Proportion de carbone du végétal frais (paramètre sans unité)

F_m Proportion de carbone de l'air sous forme minérale (paramètre sans unité)

$[C_{14}]_{air}^i$ Activité volumique du carbone 14 de l'air (Bq.m⁻³) pendant la période de temps $T_i = t_i - t_{i-1}$

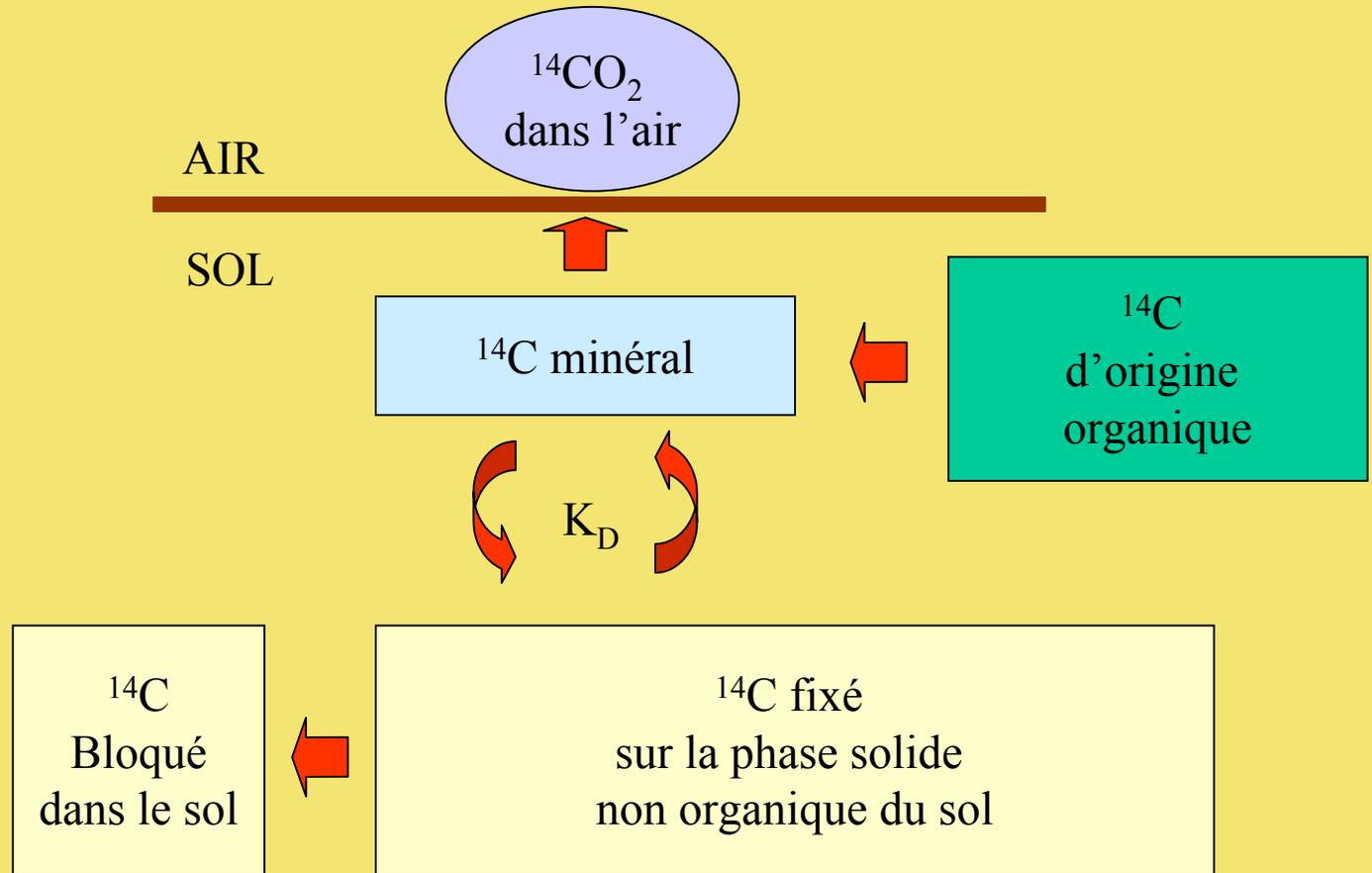
ΔM_i Accroissement de biomasse végétale pendant la période de temps $T_i = t_i - t_{i-1}$

SOL



Cycle simplifié du carbone organique dans le sol

SOL



Cycle simplifié du carbone minéral dans le sol

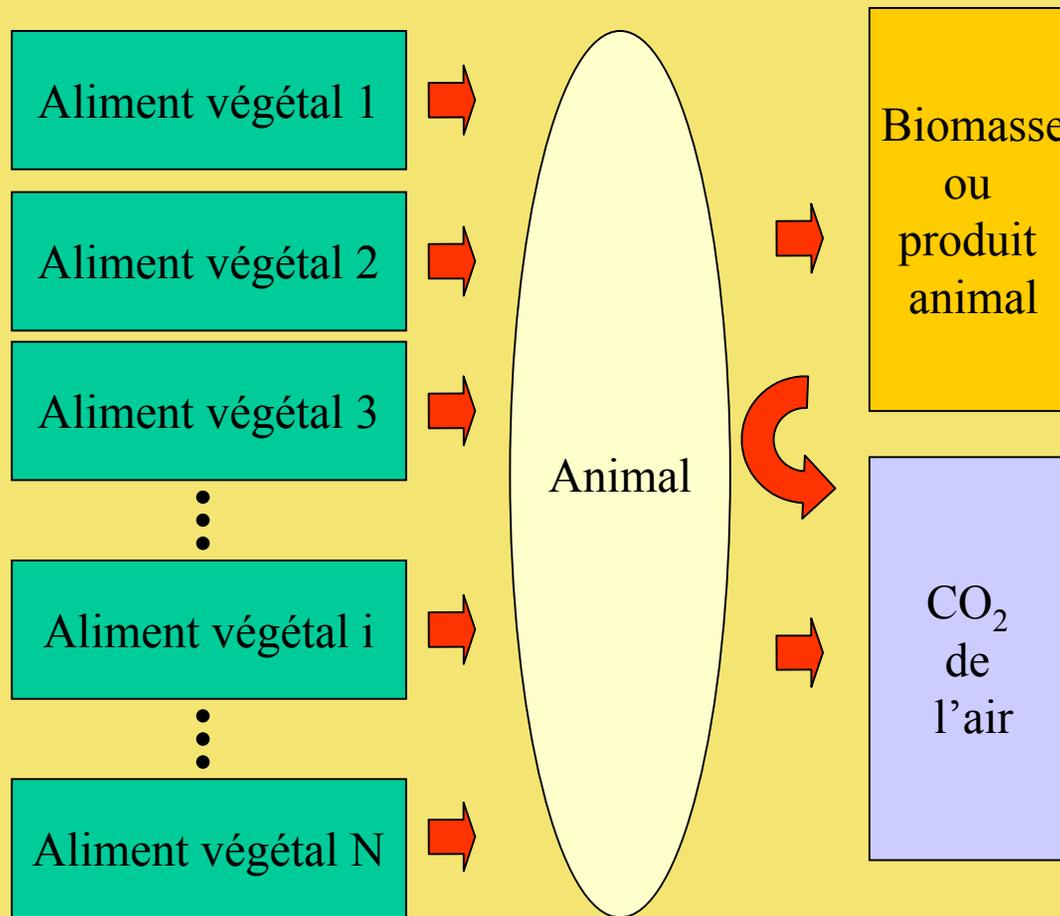
*Introduction d'un facteur correcteur du sol**SOL*

$$[C14]_{sol,air}^i = [C14]_{air}^i \cdot f_{sol}$$

avec $f_{sol} = \min(0,8 + 0,2 \cdot \frac{t}{T}; 1)$

*ou t désigne le temps écoulé depuis la contamination
et T le temps de résidence moyen du carbone dans le sol.*

ANIMAUX ET PRODUITS ANIMAUX



ANIMAUX ET PRODUITS ANIMAUX

$$[C14]_a = \frac{\sum_{i=1}^N [C14]_i \cdot R_{i,a}}{\sum_{i=1}^N f_{c,i} \cdot R_{i,a}} \cdot f_{c,a}$$

- $[C14]_a$ Activité par unité de volume ou de masse du produit animal a (Bq.l⁻¹ ou Bq.kg⁻¹)
- $f_{c,a}$ Proportion de carbone du produit animal a (kg C.kg⁻¹ ou kg C.l⁻¹)
- $f_{c,i}$ Fraction de carbone de l'aliment végétal i (kgC.kg⁻¹)
- $R_{i,a}$ Ingestion journalière de l'aliment végétal i par l'animal produisant le produit a (kg.j⁻¹)
- $[C14]_i$ Activité par unité de masse de l'aliment végétal i (Bq.kg⁻¹)

Émission continue de carbone 14

ANIMAUX ET PRODUITS ANIMAUX

$$[C14]_a = \frac{\sum_{i=1}^N 5100 \cdot f_{c,i} \cdot F_m \cdot [C14]_{air} \cdot f_{sol} \cdot \frac{\Delta M}{M_{Tot}} \cdot R_{i,a}}{\sum_{i=1}^N f_{c,i} \cdot R_{i,a}} \cdot f_{c,a}$$

- $[C14]_a$ Activité par unité de volume ou de masse du produit animal a (Bq.l⁻¹ ou Bq.kg⁻¹)
- $f_{c,a}$ Proportion de carbone du produit animal a (kg C.kg⁻¹ ou kg C.l⁻¹)
- $f_{c,i}$ Fraction de carbone de l'aliment végétal i (kgC.kg⁻¹)
- $R_{i,a}$ Ingestion journalière de l'aliment végétal i par l'animal produisant le produit a (kg.j⁻¹)
- F_m Proportion de carbone de l'air sous forme minérale (paramètre sans unité)
- $[C14]_{air}$ Activité volumique du carbone 14 de l'air (Bq.m⁻³)
- f_{sol} Facteur correcteur de l'activité volumique de l'air lié au sol
- ΔM Quantité de biomasse produite depuis le début du rejet (kg)
- $M_{Tot.}$ Quantité totale de biomasse produite pendant la croissance (kg)

Émission accidentelle de carbone 14

ANIMAUX ET PRODUITS ANIMAUX

$$[C14]_a = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \frac{\sum_{j=1}^{N_2} 5100 \cdot f_{c,i} \cdot F_m \cdot [C14]_{air}^j \cdot f_{sol} \cdot \Delta M_j}{\sum_{j=1}^{N_2} \Delta M_j} \cdot R_{i,a}}{\sum_{i=1}^{N_1} f_{c,i} \cdot R_{i,a}} \cdot f_{c,a}$$

- $[C14]_a$ Activité par unité de volume ou de masse du produit animal a (Bq.l⁻¹ ou Bq.kg⁻¹)
- $f_{c,a}$ Proportion de carbone du produit animal a (kg C.kg⁻¹ ou kg C.l⁻¹)
- $f_{c,i}$ Fraction de carbone de l'aliment végétal i (kgC.kg⁻¹)
- $R_{i,a}$ Ingestion journalière de l'aliment végétal i par l'animal produisant le produit a (kg.j⁻¹)
- F_m Proportion de carbone de l'air sous forme minérale (paramètre sans unité)
- $[C14]_{air}^j$ Activité volumique du carbone 14 de l'air (Bq.m⁻³) pendant la période de temps $T_j = t_j - t_{j-1}$
- f_{sol} Facteur correcteur de l'activité volumique de l'air lié au sol
- ΔM_j Accroissement de biomasse végétale pendant la période de temps $T_j = t_j - t_{j-1}$

HOMME

On va définir pour l'homme considéré comme point final de la chaîne de contamination un régime alimentaire type, à partir duquel pourra s'établir la quantité totale de carbone 14 reçue par alimentation pendant la période considérée (définie dans le scénario pré-établi).

Il suffit alors pour chaque aliment de multiplier sa concentration massique en carbone 14 par la quantité ingérée par unité de temps et de multiplier le tout par le facteur de dose efficace du carbone 14 qui est actuellement estimé à :

$$\text{Facteur de dose efficace } (^{14}\text{C}) = 5,8 \cdot 10^{-10} \text{ Sv.Bq}^{-1}$$

HOMME

Produit alimentaire	Quantité de carbone dans l'aliment frais (kg C.kg⁻¹)	Consommation annuelle (kg.an⁻¹)	Quantité de carbone ingérée (kg.an⁻¹)	Contribution (%) à la quantité totale ingérée
Fruits et légumes	0.050	203	10.2	8.8
Céréales	0.350	76	27.4	23.6
Pommes de terre	0.095	72	6.8	5.9
Riz	0.396	4	1.6	1.4
Sucre	0.438	33	14.4	12.4
Huile végétale	0.750	8	6.0	5.2
Lait et dérivés	0.067	103	6.9	5.9
Beurre	0.620	9	5.6	4.8
Fromage	0.350	23	8.1	7.0
Œufs	0.156	15	2.3	2.0
Viande	0.265	91	24	20.7
Poissons et produits de la pêche	0.180	15	2.7	2.3
TOTAL			116	100

CONCLUSION

Il ressort de cette étude que s'il est relativement facile de modéliser les effets sur l'homme d'une émission continue de carbone 14 dans l'atmosphère en faisant quelques simplifications justifiées par un état d'équilibre stationnaire dans les transferts de carbone 14, en revanche, dans le cas d'une émission accidentelle de carbone 14 dans l'atmosphère, ceci s'avère impossible et on doit alors intégrer l'aspect dynamique de la répartition de carbone 14 dans l'atmosphère et du non-équilibre dans les transferts.

La solution proposée dans cette étude est de s'appuyer sur des modèles de croissance végétale susceptibles de nous permettre une plus exacte appréhension de l'incorporation du carbone 14 dans la biomasse de ce végétal. Là aussi, nous procédons à une relative simplification en considérant que la partie consommée (par l'animal ou l'homme) de ce végétal suit la même loi.

CONCLUSION (bis)

Une autre simplification résulte du fait de considérer comme une constante la concentration en carbone 14 de l'air. Or, Koarashi (Koarashi et al., 2002) vient de mesurer une telle concentration proche de l'interface sol-atmosphère et démontre qu'il existe bien une variation. Alors que la valeur considérée est d'environ 250 mBq.gC⁻¹, il démontre qu'elle est de 238 mBq.gC⁻¹ à 2 m du sol, de 262 mBq.gC⁻¹ à 30 cm du sol, de 274 mBq.gC⁻¹ au niveau de l'herbe et de 304 mBq.gC⁻¹ dans l'air du sol.

Enfin, une dernière simplification est de ne pas considérer dans ces modélisations (émission continue et accidentelle) l'aspect spatial. La simplification revient à considérer que la ration alimentaire provient entièrement de la zone contaminée (de façon continue ou par accident).