

Le modèle FOCON d'évaluation de l'impact dosimétrique des rejets radioactifs atmosphériques des installations nucléaires en fonctionnement normal

C. ROMMENS*, A. MORIN*, A. MERLE-SZEREMETA*

(Manuscrit reçu le 27 mai 1998, révisé le 25 août 1998, accepté le 11 février 1999)

RÉSUMÉ

Dans le cadre de l'instruction des demandes d'autorisation de rejet, ainsi que pour l'étude de l'impact dosimétrique sur le public des rejets d'effluents atmosphériques radioactifs en fonctionnement normal des installations nucléaires, l'Institut de protection et de sûreté nucléaire a développé le logiciel FOCON96. FOCON96 calcule la dispersion des gaz et des aérosols dans l'environnement (contamination de l'air et dépôt au sol), leur transfert dans la biosphère (sols, végétaux et animaux) et leur impact sur l'homme (doses individuelles efficaces et aux organes, exposition externe au panache et au dépôt, exposition interne par inhalation et ingestion). Doté d'une interface homme-machine ergonomique et conviviale, FOCON96 propose de nombreuses fonctionnalités (modularité, valeurs par défaut, choix de bibliothèques, accès à tous les paramètres des modèles, imposition de résultats, gestion de dossiers de calcul, calculs effectués en ligne, etc.). Dans le contexte européen, une inter-comparaison avec le logiciel PC-CREAM, développé par le National Radiological Protection Board, a mis en évidence la cohérence des résultats des deux logiciels. Une même démarche comparative en ce qui concerne l'interface homme-machine et les fonctionnalités a mis en évidence une plus grande simplicité d'utilisation de FOCON96. À ce jour, FOCON96 n'est pas adapté pour effectuer une reconstitution des doses reçues une année donnée consécutivement à un fonctionnement de longue durée d'une installation. Une évolution du logiciel sera envisagée si ce type de calcul est amené à se généraliser.

ABSTRACT The FOCON model to assess doses due to the atmospheric radioactive discharges of nuclear facilities during normal operation.

To assess the dosimetric impact to the public due to atmospheric radioactive discharges of nuclear facilities during normal operation, the Institute for Protection and Nuclear Safety has developed the FOCON96 code. FOCON96 calculates the

* Institut de protection et de sûreté nucléaire, DPHD/SEGR/SAER, IPSN, BP n°6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, France.

dispersion of gases and aerosols into the environment (atmosphere contamination and ground deposition), their transfer in the biosphere (soils, plants and animals) and their impact to a member of the public (individual effective and equivalent doses, external exposure to the plume and to the deposits, internal exposure by inhalation and ingestion). FOCON96 uses ergonomic windows and proposes many capabilities (modular architecture, default values, choice of libraries, access to all the parameters of the models, listing of results, management of result files, calculations made directly, etc.). In the European context, an intercomparison with the PC-CREAM code, developed by the National Radiological Protection Board, has shown the coherence of the results of the two codes. A comparison of the windows and capabilities has shown that FOCON96 was easier to use. FOCON96 is not adapted to calculate the doses received during one particular year that are due to the discharges of a facility in operation for a long period of time. An evolution of the software will be considered if this kind of assessment is generalized.

1. Introduction

À la fin des années 1980, l'Institut de protection et de sûreté nucléaire a développé le modèle FOCON basé sur la méthodologie européenne (CCE, 1979). Ce modèle permet de calculer les conséquences dosimétriques des rejets radioactifs atmosphériques des installations nucléaires en fonctionnement normal, et plus particulièrement lors de l'instruction des demandes d'autorisation de rejet. Les nouveaux acquis méthodologiques (CCE, 1995) et les évolutions réglementaires (Décret 95-540 et Directive 96/29/Euratom) ont conduit à actualiser le modèle avec le développement d'un logiciel moderne convivial, FOCON96 (Morin, 1998). Cet article décrit les principales caractéristiques de FOCON96, à savoir les équations, les hypothèses et les limites du modèle. Des valeurs pour les paramètres du modèle sont proposées par défaut en l'absence de meilleures valeurs, notamment de valeurs spécifiques du site étudié. Les fonctionnalités de FOCON96 sont présentées. Dans le contexte européen, le logiciel PC-CREAM qui répond aux mêmes objectifs a été diffusé récemment (PC-CREAM, 1997). Une comparaison entre FOCON96 et PC-CREAM a été entreprise dont les principaux éléments apparaissent dans la présente note.

2. Le modèle FOCON

L'estimation de l'impact dosimétrique est réalisée par l'enchaînement de trois modules de calcul décrivant respectivement : la dispersion atmosphérique, le transfert dans la biosphère et l'impact sur l'homme. Les quatre voies d'exposition constitutives de la dose individuelle reçue sont l'exposition externe par le panache, l'exposition externe par le dépôt, l'exposition interne par inhalation et l'exposition interne par ingestion.

2.1. Dispersion atmosphérique

Le modèle de dispersion utilisé pour le calcul des coefficients de transfert atmosphérique (CTA) est le modèle de Doury (Doury, 1976) qui prend comme solution de l'équation de diffusion une distribution gaussienne à trois dimensions. Parmi les variantes du modèle gaussien de la méthodologie européenne (CCE, 1995), l'approche par les écarts types de Doury a été préférée à celle des classes de Pasquill/Smith/Hosker. Les CTA obtenus selon les deux approches sont comparables grâce à la table de correspondance Doury-Pasquill (IAEA, 1980).

La dispersion des radionucléides dans l'atmosphère sur l'ensemble de l'année est traitée par le module de calcul COTRAM (Deville-Cavelin *et al.*, 1994) qui a été inséré dans le logiciel FOCON96. Le calcul des CTA prend en compte l'appauvrissement du panache par dépôt sec et par dépôt humide ainsi que le phénomène de réflexion sur le sol. Pour un radionucléide donné, la concentration atmosphérique moyenne annuelle s'écrit :

$$A_{\text{air}}(r, \theta, z) = \text{CTA}_{\text{moyen}}(r, \theta, z) Q \quad (1)$$

A_{air} : concentration atmosphérique moyenne annuelle ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$),
 r, θ, z : coordonnées polaires du point de calcul,
 $\text{CTA}_{\text{moyen}}$: coefficient de transfert atmosphérique moyen annuel ($\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$),
 Q : débit de rejet moyen annuel ($\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$).

Le dépôt des radionucléides est dû aux échanges turbulents air-sol et à la gravité (« dépôt sec ») ainsi qu'à l'entraînement par les précipitations (« dépôt humide »). Le débit de dépôt sec moyen annuel est proportionnel à la concentration atmosphérique moyenne annuelle. Il s'écrit :

$$\Delta_s(r, \theta) = V_d A_{\text{air}}(r, \theta, 0) \quad (2)$$

Δ_s : débit de dépôt sec moyen annuel ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),
 V_d : vitesse de dépôt par temps sec ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Le débit de dépôt humide moyen annuel s'écrit :

$$\Delta_h(r, \theta) = \int_0^{h_p} \Lambda_p Q \text{CTA}_{\text{pluie}}(r, \theta) dz \quad (3)$$

Δ_h : débit de dépôt humide moyen annuel ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),
 Λ_p : taux de lavage par les précipitations (s^{-1}),
 h_p : hauteur de la couche lessivée par la pluie (m),
 $\text{CTA}_{\text{pluie}}$: coefficient de transfert atmosphérique moyen annuel par temps de pluie ($\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$).

Le débit de dépôt total est la somme du débit de dépôt sec et du débit de dépôt humide.

L'activité déposée sur le sol est calculée dans la dernière année de fonctionnement de l'installation, année où l'activité déposée est maximale. Elle est obtenue en intégrant, sur le temps de fonctionnement de l'installation, l'équation qui combine les débits de dépôt par temps sec et par temps de pluie avec les pertes par décroissance radioactive et migration dans le sol. L'intégration conduit au résultat suivant :

$$A_{\text{sol}} = (\Delta_s + \Delta_h) \frac{1 - e^{-(\lambda_m + \lambda_r)t_f}}{\lambda_m + \lambda_r} \quad (4)$$

A_{sol} :	activité déposée sur le sol (Bq.m ⁻²),
λ_m :	constante de décroissance par migration dans le sol du radionucléide considéré (s ⁻¹),
λ_r :	constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré (s ⁻¹),
t_f :	durée de fonctionnement de l'installation (s).

La valeur par défaut de la vitesse de dépôt par temps sec est fixée à 5×10^{-3} m.s⁻¹ pour tous les radionucléides sauf les gaz rares, le tritium et le carbone 14 (*cf.* Parag. 2.3) pour lesquels cette valeur est nulle ; la valeur par défaut du taux de lavage par les précipitations est 2×10^{-4} s⁻¹ pour les sites français et elle correspond à une pluie moyenne de 2 mm.h⁻¹ (Deville-Cavelin *et al.*, 1994). La valeur par défaut de la constante de décroissance par migration dans le sol correspond à une période de 100 ans (CCE, 1995). La durée de fonctionnement de l'installation est égale à 30 ans par défaut (cas du réacteur de puissance).

2.2. Transfert dans la biosphère

Ce module évalue les transferts des radionucléides entre les différents compartiments de l'environnement : les sols, l'air, les végétaux et les animaux. La remise en suspension, considérée comme une voie d'exposition secondaire en fonctionnement normal, n'est pas modélisée dans FOCON.

2.2.1. Transfert aux végétaux

Après dispersion dans l'atmosphère, les radionucléides se déposent sur le sol et sur les parties aériennes des végétaux, conduisant finalement aux deux grandes voies de transfert vers le végétal qui sont le transfert foliaire et le transfert racinaire appelés aussi transfert direct et transfert indirect.

LE MODÈLE FOCON D'ÉVALUATION DE L'IMPACT DOSIMÉTRIQUE

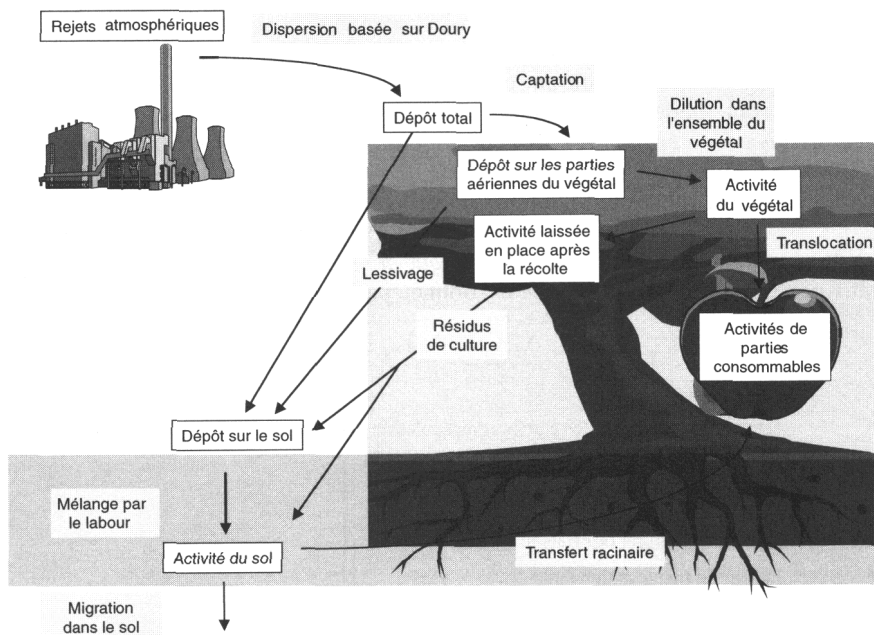


Fig. 1. – Modélisation de la contamination des végétaux.
Modelling of the radionuclide transfer to plants.

Transfert foliaire

Le point de départ du transfert foliaire est la fraction du dépôt retenue sur les parties aériennes du végétal. Ce phénomène est modélisé par le *rapport de captation*, fraction du dépôt interceptée par les parties aériennes du végétal. On considère que le franchissement des enveloppes externes des parties aériennes du végétal s'effectue sans perte d'activité et donc que l'activité déposée sur les parties aériennes se répartit par dilution dans le végétal. Les valeurs proposées par défaut pour le rapport de captation par temps sec ont été calculées pour chaque végétal par la méthode de Chamberlain modifiée (Renaud *et al.*, 1994). Pour le rapport de captation par temps de pluie, la valeur proposée par défaut est égale à 0,1 pour tous les végétaux (CCE, 1979). Le *facteur de translocation*, rapport de l'activité massique entre la partie comestible et la biomasse du végétal, permet d'obtenir l'activité massique dans les parties comestibles. Les valeurs du facteur de translocation proposées par défaut pour chaque végétal sont issues de la littérature (Renaud *et al.*, 1994) en regroupant les radionucléides en deux catégories selon leur mobilité dans les végétaux. Entre l'instant où les particules radioactives se déposent sur le végétal et la récolte du végétal, trois phénomènes contribuent à la diminution de

l'activité massique du végétal : la décroissance radioactive, un phénomène mécanique (le lessivage par la pluie des parties aériennes des végétaux) et un phénomène biologique (la dilution par croissance du végétal). Ces deux derniers phénomènes sont modélisés à l'aide d'une seule constante appelée *constante de décroissance biomécanique*. La valeur de cette constante proposée par défaut pour tous les végétaux correspond à une période de 14 jours pour tous les radionucléides sauf les isotopes du césium (24 jours) et de l'iode (9 jours) (Renaud *et al.*, 1994).

Pour un radionucléide, l'activité massique dans les parties comestibles des végétaux par voie foliaire à la récolte est donnée par :

$$A_{\text{feu}} = \frac{(R_s \Delta_s + R_h \Delta_h)}{r} F_t \frac{1 - e^{-(\lambda_{\text{bm}} + \lambda_r) t_{\text{vég}}}}{\lambda_{\text{bm}} + \lambda_r} \quad (5)$$

- A_{feu} : activité massique dans les parties comestibles du végétal par transfert foliaire (Bq.kg⁻¹frais),
 R_s : rapport de captation par temps sec (s.d.),
 R_h : rapport de captation par temps de pluie (s.d.),
 r : rendement cultural (kg frais.m⁻²),
 F_t : facteur de translocation (s.d.),
 λ_{bm} : constante de décroissance biomécanique (s⁻¹),
 $t_{\text{vég}}$: temps de croissance du végétal (s).

Les rendements proposés par défaut sont les rendements français (Renaud *et al.*, 1994). Les valeurs proposées par défaut pour le temps de croissance des végétaux sont issues de la littérature (ITCF, 1996).

Transfert racinaire

Le dépôt sur le sol correspond à ce qui n'a pas été intercepté par les feuilles des végétaux. Il faut ajouter à ce dépôt les flux provenant du transfert foliaire et se retrouvant à la surface du sol, à savoir : la fraction de contamination lessivée et celle non exportée à la récolte (résidus de culture contaminés et laissés sur le champ lors de la récolte). La quantification de l'activité déposée sur le sol résultant de ces deux mécanismes est difficile car elle dépend de différents paramètres (pratiques culturales, type de culture). Afin de rester conservatif pour l'estimation du transfert racinaire, le modèle FOCON retient comme dépôt celui déjà calculé correspondant à la dernière année de fonctionnement de l'installation. Les radionucléides déposés à la surface du sol sont ensuite homogénéisés par le labour dans l'épaisseur de sol labouré, choisie égale à 30 cm (CCE, 1995). Pour les prairies permanentes, le modèle proposé dans la littérature (CCE, 1995) a été simplifié car FOCON ne considère qu'une couche de sol de 5 cm pour laquelle la concentration de chacun des radionucléides est homogène. La valeur par défaut de la masse volumique du sol sec est de 1300 kg.m⁻³ (IAEA, 1982).

Le facteur de transfert racinaire ou facteur de transfert sol/plante permet de quantifier la fraction d'activité présente dans un sol qu'un végétal prélève par ses racines. Il s'exprime par le rapport entre l'activité massique contenue dans le végétal frais et l'activité massique contenue dans le sol. Les valeurs proposées par défaut sont issues de la littérature (Métivier et Bénédicti, 1994). Pour chaque radionucléide, l'activité massique dans les parties comestibles des végétaux par voie racinaire à la récolte est donnée par :

$$A_{\text{rac}} = \frac{A_{\text{sol}}}{\rho h} F_{\text{rac}} \quad (6)$$

- A_{rac} : activité massique dans les parties comestibles du végétal par transfert racinaire (Bq.kg⁻¹frais),
 F_{rac} : facteur de transfert sol-plante (Bq.kg⁻¹ de végétal frais par Bq.kg⁻¹ de sol sec),
 ρ : masse volumique du sol sec (kg de sol sec.m⁻³),
 h : profondeur de l'horizon racinaire (m).

Pour un radionucléide, l'activité massique totale dans les parties comestibles du végétal au moment de la récolte, $A_{\text{vég}}$, est alors la somme de A_{feu} et A_{rac} .

Devenir des radionucléides après la récolte

Le seul phénomène de diminution d'activité qui subsiste après la récolte est la décroissance radioactive. Pour les végétaux consommés par l'homme, soit le végétal est consommé frais (au sens consommé directement à la sortie du champ) et FOCON néglige la décroissance radioactive entre le moment de la récolte et le moment de la consommation, soit le végétal est stocké et FOCON tient compte de la décroissance radioactive pendant la période de stockage. La répartition entre ces deux cas est fonction de la durée de la période de consommation du végétal frais dont les valeurs par défaut sont respectivement 12 mois pour les légumes-feuilles et les légumes-racines et 8 mois pour les légumes-fruit. De plus, FOCON tient compte de l'influence des pratiques culinaires (cuisson, lavage, pelage, ...) sur la concentration des radionucléides dans l'aliment végétal consommé par l'homme (par défaut la valeur du facteur de décontamination dû aux pratiques culinaires est prise égale à 1). Pour les végétaux consommés par les animaux, ils sont soit consommés frais, soit consommés après stockage. Pour chaque radionucléide, dans les végétaux consommés par l'homme, l'activité au moment de la consommation est donnée par :

$$A_{\text{conso}} = A_{\text{vég}} \left[\frac{T_{\text{fra}}}{12} + \left(1 - \frac{T_{\text{fra}}}{12} \right) e^{-\lambda_r t_{\text{stock}}} \right] F_{\text{dec}} \quad (7)$$

Pour chaque radionucléide, l'activité dans les végétaux consommés par les animaux au moment de la consommation est donnée par :

$$A_{\text{conso}} = A_{\text{vég}} \left[\frac{D_{\text{conso}}}{12} e^{-\lambda_r t_{\text{stock}}} \right] \quad (8)$$

- A_{conso} : activité massique dans l'aliment au moment de sa consommation (Bq.kg^{-1} frais),
- $A_{\text{vég}}$: activité massique dans les parties comestibles du végétal à la récolte (Bq.kg^{-1} frais),
- T_{fra} : durée de consommation du végétal directement sorti du champ (mois),
- t_{stock} : durée moyenne de stockage du végétal avant consommation pendant la fraction de temps $(1-T_{\text{fra}}/12)$ (s),
- $F_{\text{déc}}$: facteur de décontamination due aux pratiques culinaires (s.d.),
- D_{conso} : durée de consommation du végétal (mois.an^{-1}).

Les valeurs par défaut proposées pour la durée moyenne de stockage des végétaux sont issues de la littérature (Quinault *et al.*, 1989). Celles proposées pour la durée de consommation des végétaux par les animaux sont de 6 mois pour la vache et de 12 mois pour les autres animaux.

2.2.2. Transfert à l'animal

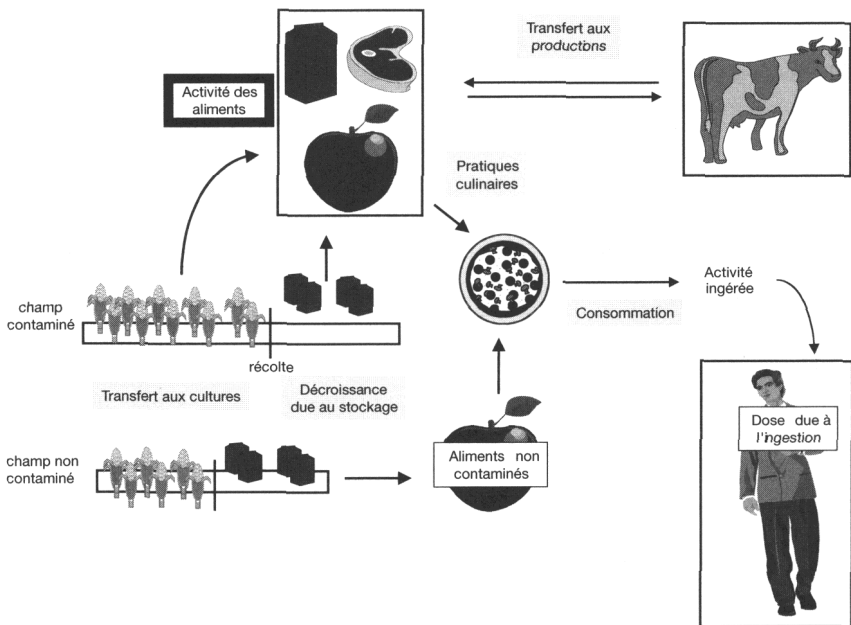


Fig. 2. – Modélisation des transferts de radionucléides aux animaux et à l'homme.
Modelling of the radionuclide transfer to animals and people by ingestion.

Le transfert des radionucléides à l'animal se fait par ingestion de végétaux et de sol. Le transfert aux aliments d'origine animale (viande, lait) se déduit de l'activité ingérée par les animaux par un coefficient de transfert. Les valeurs par défaut de ces coefficients de transfert sont issues de la littérature (Métivier et Bénédicti, en cours). Le modèle FOCON prend en compte la *fraction exogène* des aliments ingérés par l'animal, c'est-à-dire la fraction des aliments provenant de zones non affectées par les rejets considérés (la valeur proposée par défaut est nulle). Pour chaque radionucléide, l'activité massique présente dans le produit animal est donnée par :

$$A_{\text{ani}} = \left[\sum_{\text{vég}} (A_{\text{conso}} Q_{\text{vég}} (1 - E_{\chi})) + \frac{A_{\text{sol}}}{\text{ph}} Q_{\text{sol}} \right] F_{\text{ani}} \quad (9)$$

- A_{ani} : activité massique du produit animal à la collecte ou à l'abattage (Bq.kg⁻¹ frais),
 $Q_{\text{vég}}$: consommation quotidienne du végétal par l'animal (kg.j⁻¹),
 E_{χ} : fraction exogène des végétaux (s.d.),
 Q_{sol} : consommation quotidienne de sol par l'animal (kg.j⁻¹),
 F_{ani} : coefficient de transfert au produit animal (Bq.kg⁻¹ de produit animal par Bq ingéré.j⁻¹).

Les valeurs par défaut pour la consommation quotidienne de végétaux par l'animal sont issues de la littérature (Quinault *et al.*, 1989). Par défaut, la consommation de sol est prise égale respectivement à 4 % et à 20 % de la ration d'herbe en poids sec pour les bovins et pour les ovins (CCE, 1995).

De même que les produits végétaux, les produits animaux sont susceptibles de stockage et de transformation après l'abattage ou la collecte du produit animal. FOCON prend en compte la décroissance radioactive lors du stockage des aliments d'origine animale avant leur consommation par l'homme ainsi que la variation de contamination due aux pratiques culinaires (Quinault *et al.*, 1989). Pour chaque radionucléide, l'activité massique dans l'aliment d'origine animale au moment de la consommation par l'homme est donnée par l'équation (7) en remplaçant l'activité du végétal à la récolte, $A_{\text{vég}}$, par l'activité du produit animal à la collecte ou à l'abattage, A_{ani} .

2.3. Cas particuliers du Tritium et du Carbone 14

Du fait du rôle fondamental que jouent l'hydrogène et le carbone dans les systèmes biologiques, un modèle spécifique est utilisé pour traduire les transferts de tritium et de carbone 14 dans l'environnement. Ce modèle utilise les rapports de la concentration de l'élément dans les produits animaux ou végétaux à la concentration de l'élément dans l'air proposés par la littérature (CCE, 1995).

L'activité massique en tritium ou en carbone 14 dans les végétaux ou les aliments d'origine animale est donnée par :

$$A_{\text{vég ou ani}} = A_{\text{air}} K_i \text{ vég ou ani} \quad (10)$$

$A_{\text{vég ou ani}}$: activité massique dans le produit végétal ou animal (Bq.kg⁻¹ frais),

A_{air} : concentration atmosphérique moyenne annuelle du radionucléide (Bq.m⁻³),

$K_i \text{ vég ou ani}$: rapport de la concentration du radionucléide i (tritium ou carbone 14) dans l'aliment à la concentration du radionucléide i dans l'air (Bq.kg⁻¹ frais par Bq.m⁻³).

3. Impact dosimétrique

3.1. Exposition externe

3.1.1. Exposition externe au panache

Lorsqu'il se trouve dans le panache, l'individu est exposé à une atmosphère contaminée. FOCON modélise cette exposition en supposant que l'individu est immergé dans un nuage de dimension semi-infinie. Il est fait l'hypothèse d'un régime d'équilibre, c'est-à-dire que les activités volumiques des radionucléides contenus dans le panache sont constantes au cours de la période de rejet considérée, prise ici égale à une année. Pour un radionucléide, la *dose efficace annuelle* est donnée par :

$$H_{\text{pan}} = A_{\text{air}} CD_{\text{pan}} F_{\text{tp}} \quad (11)$$

H_{pan} : dose efficace annuelle due au panache (Sv.an⁻¹),

CD_{pan} : coefficient de dose efficace externe au panache (Sv.an⁻¹ par Bq.m⁻³),

F_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache (s.d.).

Les valeurs par défaut des coefficients de dose efficace externe au panache sont issues du Federal Guidance 12 (FGR 12, 1993). La fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache est prise égale à 1 par défaut.

3.1.2. Exposition externe au dépôt

Le calcul de la dose annuelle due au dépôt s'effectue pour la dernière année de fonctionnement de l'installation. Afin de simplifier tout en restant majorant, la décroissance radioactive par migration dans le sol a été négligée pour cette voie

d'exposition dans le logiciel FOCON96. Pour un radionucléide, la *dose efficace annuelle* est donnée par :

$$H_{\text{dep}} = (\Delta_s + \Delta_n) \frac{1 - e^{-\lambda_r t_r}}{\lambda_r} CD_{\text{dep}} F'_{\text{tp}} \quad (12)$$

H_{dep} : dose efficace annuelle due au dépôt (Sv.an⁻¹),

CD_{dep} : coefficient de dose efficace externe au dépôt (Sv.an⁻¹ par Bq.m⁻²),

F'_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition externe au dépôt (s.d.).

Les valeurs par défaut des coefficients de dose efficace externe au dépôt sont issues du Federal Guidance 12 (FGR 12, 1993). La fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition externe au dépôt est prise égale à 1 par défaut.

3.2. Exposition interne

3.2.1. Exposition interne par inhalation

L'individu subit une exposition interne par inhalation lorsqu'il est immergé dans le panache. Pour un radionucléide, la *dose efficace annuelle due à l'inhalation* est alors obtenue en multipliant l'activité inhalée par le coefficient de dose par inhalation correspondant, soit :

$$H_{\text{inh}} = A_{\text{air}} D_{\text{resp}} CD_{\text{inh}} F''_{\text{tp}} \quad (13)$$

H_{inh} : dose efficace annuelle par inhalation (Sv.an⁻¹),

D_{resp} : débit respiratoire de l'individu (m³.an⁻¹),

CD_{inh} : coefficient de dose efficace par inhalation (Sv.Bq⁻¹),

F''_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition interne par inhalation (s.d.).

La valeur par défaut du débit respiratoire de l'individu (adulte) est issue de la CIPR71 (ICRP, 1995). Les valeurs des coefficients de dose efficace due à l'inhalation sont issues de la Directive 96/29/Euratom. Pour un calcul de dose aux organes, les coefficients de dose sont par défaut issus de la CIPR30 (ICRP, 1981). La fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition interne par inhalation est prise égale à 1 par défaut.

3.2.2. Exposition interne par ingestion (voir Fig. 2)

De même que pour le transfert de radionucléides aux produits animaux, le modèle FOCON prend en compte la fraction exogène des aliments ingérés par l'homme (la valeur proposée par défaut est égale à 0). Pour un radionucléide, la *dose efficace*

annuelle due à l'ingestion est obtenue en multipliant l'activité ingérée par le coefficient de dose par ingestion correspondant, soit :

$$H_{\text{ing}} = \sum_{\text{ali}} [A_{\text{conso}} Q_{\text{ali}} (1 - E_x)] CD_{\text{ing}} \quad (14)$$

H_{ing} : dose efficace annuelle par ingestion (Sv.an⁻¹),

Q_{ali} : consommation annuelle de l'aliment (kg.an⁻¹),

E_x : fraction exogène des aliments (s.d.),

CD_{ing} : coefficient de dose efficace par ingestion (Sv.Bq⁻¹).

Les valeurs des coefficients de dose efficace due à l'ingestion sont issues de la Directive 96/29/Euratom. Pour un calcul de dose aux organes, les coefficients de dose sont par défaut issus de la CIPR30 (ICRP, 1981). Les valeurs par défaut pour la consommation annuelle des aliments sont issues des enquêtes de l'INSEE (Bertrand, 1993).

L'impact dosimétrique dû au rejet de l'ensemble des radionucléides sur un individu est calculé en sommant les doses associées à toutes les voies d'exposition et pour tous les radionucléides.

4. Fonctionnalités du logiciel FOCON96

Le logiciel FOCON96 fonctionne sous Windows95 avec une interface homme-machine graphique. Il possède une architecture modulaire qui s'appuie sur les entrées de l'utilisateur (radionucléides, formes physico-chimiques, végétaux, ...) ainsi que sur des bibliothèques (paramètres radioécologiques, coefficients de dose) et produit un dossier de calcul (fichier informatique contenant l'ensemble de tous les paramètres du calcul ainsi que les résultats produits), lui-même modulaire. Les bibliothèques contiennent les valeurs numériques par défaut associées aux variables et paramètres. L'utilisateur peut modifier une ou plusieurs valeurs par défaut mais l'accès aux bibliothèques est de l'unique ressort d'un administrateur. Il a aussi la possibilité d'imposer un certain nombre de résultats à l'issue des modules de dispersion et de transfert, ce qui lui permet de réaliser une étude en utilisant comme données d'entrée des résultats de mesures. L'utilisateur peut imprimer tout ou partie du dossier de calcul, sous forme de fichiers ASCII, d'exports possibles vers EXCEL et de fonctions d'interrogation des sorties (regroupement de radionucléides par exemple).

5. Comparaison FOCON96 - PC-CREAM

Le logiciel PC-CREAM (Consequences of Releases to the Environment Assessment Methodology), développé par le NRPB, est un logiciel d'évaluation de l'impact de rejets d'effluents radioactifs dans l'atmosphère, en rivière ou en mer

en fonctionnement normal des installations (PC-CREAM, 1997). Une intercomparaison entre FOCON96 et PC-CREAM a été réalisée (Morin et Merle-Szeremeta, 1998). Bien que cette comparaison ne soit pas exhaustive (faible nombre de points de calcul, étude réalisée sur une seule installation), les doses individuelles efficaces totales calculées avec les deux logiciels sont dans un rapport inférieur à deux. D'un point de vue fonctionnel, PC-CREAM, du fait de son architecture, est beaucoup plus complexe à utiliser que FOCON96. Le logiciel PC-CREAM propose trois modèles de dispersion atmosphérique (Pasquill, Hosker et Doury). Le format des données météorologiques à rentrer dans PC-CREAM pour utiliser le modèle de Doury est figé et n'est pas adapté au format dont dispose l'utilisateur. Un redimensionnement de la rose des vents doit être réalisé à chaque utilisation de PC-CREAM. Ce redimensionnement n'est pas nécessaire pour utiliser FOCON96, le format des données météorologiques étant laissé au libre choix de l'utilisateur.

Si l'utilisateur ne souhaite pas utiliser les valeurs par défaut proposées par PC-CREAM dans les modules de dispersion et de transfert, il doit exécuter ces deux modules indépendamment du module de calcul de dose afin de créer les bibliothèques de données qu'il devra ensuite charger dans ce dernier module.

L'imposition de résultats à l'issue des modules de dispersion et de transfert est impossible dans PC-CREAM. Dans FOCON96, les résultats obtenus à l'issue des modules de dispersion, de transfert et d'impact sont visualisables à l'écran au fur et à mesure de la création d'un dossier de calcul. Dans PC-CREAM, ces résultats sont stockés dans différents fichiers, plus ou moins conviviaux, que l'utilisateur peut consulter après avoir lancé le calcul.

Le module de transfert de PC-CREAM est un modèle compartimental qui n'est pas comparable au modèle utilisé dans FOCON96. PC-CREAM fournit une évaluation du transfert dans l'environnement plus fine que FOCON96.

En ce qui concerne le module d'impact, FOCON96 calcule des doses individuelles efficaces et équivalentes aux organes. Les valeurs par défaut des paramètres permettent de faire des calculs pour l'adulte, cependant, les valeurs des paramètres peuvent être modifiées pour un calcul pour une autre classe d'âge. PC-CREAM ne calcule que des doses individuelles efficaces pour l'enfant de 1 an, 10 ans et pour l'adulte ; de plus, il fournit des doses collectives. Les coefficients de dose utilisés dans PC-CREAM n'apparaissent pas dans l'interface homme-machine. Ils sont visualisables dans des fichiers spécifiques, ce qui rend leur modification plus contraignante.

6. Conclusion

Le logiciel FOCON96 avec ses présentes valeurs par défaut est particulièrement adapté à l'instruction de demandes d'autorisation de rejet. Son ergonomie et sa convi-

vialité permettent une utilisation facile et courante. Une comparaison de FOCON96 avec le logiciel européen PC-CREAM a mis en évidence la cohérence des résultats des deux codes. L'état de l'art ainsi que le retour d'expérience montrent quelques déficiences de FOCON96 dans certains domaines précis. En particulier, le logiciel FOCON96 n'est pas adapté au calcul en une année donnée de l'impact d'un site en fonctionnement depuis plusieurs années. En effet, il ne permet pas d'entrer un spectre de rejet annuel différent pour chaque année de fonctionnement de l'installation. La remarque est d'ailleurs aussi valable pour PC-CREAM. La solution possible est alors de réitérer le calcul autant de fois qu'il y a d'années de fonctionnement en modifiant les valeurs par défaut de certains paramètres. Une évolution de FOCON96 pourrait être envisagée si ce type de calcul est amené à se généraliser.

RÉFÉRENCES

- Bertrand M. (1993) *Consommation et lieux d'achat des produits alimentaires en 1991*. Collection INSEE Résultats, Paris.
- CCE (1979) Communautés Européennes, *Méthodologie pour l'évaluation des conséquences radiologiques des rejets d'effluents radioactifs en fonctionnement normal*. Doc. N°V/3865/79-EN, Luxembourg.
- CCE (1995) Communautés Européennes, *Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment*. EUR 15760 EN, Luxembourg.
- Décret N°95-540 du 4 mai 1995 relatif aux rejets d'effluents liquides et gazeux et aux prélèvements d'eau des installations nucléaires de base.
- Deville-Cavelin G., Crabot B., Monfort M. (1994) Description du code COTRAM2 de calcul de coefficients de transfert atmosphérique moyen. Note Technique IPSN/DPEA/SEAC 94/188, Fontenay-aux-Roses.
- Directive 96/29/Euratom du Conseil, du 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.
- Doury A. (1976) *Une méthode de calcul pratique et générale pour la prévision numérique des pollutions véhiculées par l'atmosphère*. Rapport CEA-R-4280 (Rév.1), CEA/Service de documentation, Gif-sur-Yvette.
- FGR 12 (1993) *Dose Coefficients from Federal Guidance*. RSIC Data Library Collection - 167, Oak Ridge National Laboratory.
- ITCF (1996) Institut Technique des Céréales et des Fourrages, Calendriers agricoles de stades-clés en grandes cultures.
- IAEA (1980) *Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting*. Safety Series n°50-SG-S3, Vienna.
- IAEA (1982) *Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases: Exposures of critical groups*. Safety Series n°57, Vienna.
- ICRP (1995) International Commission on Radiological Protection n°71, *Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4, Inhalation dose coefficients*. Pergamon Press, Oxford.

LE MODÈLE FOCON D'ÉVALUATION DE L'IMPACT DOSIMÉTRIQUE

- ICRP (1981) International Commission on Radiological Protection n° 30, *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*. Pergamon Press, Oxford.
- Métivier J.M., Bénédicti J.C. (1994) *Synthèse bibliographique du facteur de transfert racinaire*. Document IPSN/SERE 94/039, St Paul-lez-Durance.
- Métivier J.M., Bénédicti J.C. (en cours) *Synthèse bibliographique entre la nourriture et un produit d'origine animale*. Document IPSN/DPEI/SERE, St Paul-lez-Durance.
- Morin A. (1998) *FOCON96 Version 1.0 Notice Théorique*. Document IPSN/SAER 96/108 Indice 5, Fontenay-aux-Roses.
- Morin A., Merle-Szeremeta A. (1998) Use of PC-CREAM: dosimetric impact of atmospheric discharges of a nuclear powerplant, PC-CREAM User Group.
- PC-CREAM (1997) National Radiological Protection Board. EUR 17791 EN (NRPB-SR296).
- Quinault J.M., Cartier Y., Bourdeau F. (1989) *Guide d'évaluation de l'impact de rejets radioactifs atmosphériques*. EDF Direction de l'Équipement.
- Renaud P., Maubert M., Badie P. (1994) *Les modèles de transferts des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre*. Document IPSN/DPEI/SERE/LMTR, St Paul-lez-Durance.