

# Logiciel pour une évaluation rapide des conséquences d'une retombée radioactive sur la chaîne alimentaire : applications au milieu tropical

C. GROUZELLE\*, F. LAYLA VOIX F.\*\*, M.F. BAUDOT\*, R. DUCOUSSO\*\*\*

(Manuscrit reçu le 17 décembre 1992,  
révisé le 27 août 1994, accepté le 15 décembre 1994)

**RÉSUMÉ** Un logiciel ayant pour but l'évaluation rapide des conséquences d'une retombée radioactive sur la chaîne alimentaire est présenté. A partir de l'activité surfacique mesurée après 24 heures de dépôt, il calcule la dose ingérée par la population à l'issue des soixante premiers jours d'exposition ; cette durée correspond à 2 ou 4 périodes d'élimination mécanique des radionucléides de la surface des végétaux. Lors de son élaboration, il a été tenu compte de la facilité d'accès aux paramètres spécifiques locaux, de son caractère convivial et de la possibilité d'être utilisable sur tout ordinateur PC employant le système d'exploitation MS.DOS.

**ABSTRACT** A software has been developed for a fast assesement of the consequences of a radioactive fallout on the food chain. From the surface activity measured 24 h after deposition, it computes the dose ingested by the population on the 60<sup>th</sup> day of exposure ; this duration corresponds to 2 or 4 mechanical clearance half-lives of the radionuclides at the vegetal surface. Particular attention was paid to easy access to specific local parameters, conviviality and possibility to be used on any MS.DOS operated PC.

## 1. Introduction

Une émission non concertée de matières radioactives peut entraîner une exposition de la population justifiant la mise en œuvre de mesures appropriées pour la protection de celle-ci. L'efficacité de ces mesures dépend en partie de la précocité de l'évaluation des expositions. De nombreux modèles et codes de calcul [2, 7, 10, 12, 15] ont été établis pour effectuer cette évaluation : ils portent généralement sur les conséquences à long terme associées aux différentes voies d'atteinte à partir d'un terme source constitué par l'émission elle-même.

\* Direction des Centres d'expérimentations nucléaires (DirCEN), Service mixte de contrôle biologique (SMCB), BP 208, 91311 Montlhéry.

\*\* Commissariat à l'énergie atomique, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Département de protection de la santé de l'homme et de dosimétrie (IPSN/DPHD), BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex, décédée le 3 mars 1994.

\*\*\* Service de protection radiologique des armées, 1 bis, rue du Lt Raoult Batany, 92140 Clamart.

L'objet du présent travail a été d'établir un logiciel qui prenne en compte le dépôt surfacique. L'évaluation de celui-ci peut-être réalisée par le calcul à partir des relevés effectués à l'émission ou, mieux, par les mesures du dépôt surfacique habituellement recueillies par les stations de surveillance. Le code de calcul, fourni par l'IPSN/DPHD et traité par ce logiciel, se limite aux apports directs à la chaîne alimentaire pouvant entraîner des conséquences immédiates et nécessiter des contre-mesures rapides. Les caractéristiques d'utilisation du logiciel présenté répondent à cette exigence. Ainsi, lors de son adaptation à la région à surveiller – ici les tropiques – les paramètres du code de calcul à quantifier sont peu nombreux et aisément accessibles et, lors de la prévision de la dose à la population, son maniement est facilité par l'emploi d'un compilateur (CLIPPER). En effet, ce dernier rend possible la création d'une interface conviviale en facilitant l'accès aux logiciels de calcul et de stockage des données. Ces dispositions permettent aux non-informaticiens d'utiliser ce logiciel sur tout ordinateur employant le système d'exploitation MS.DOS.

## **2. Terme source et milieu contaminé pris en compte**

### **2.1 Terme source et conditions météorologiques**

Le terme source est l'activité déposée au sol sur une surface d'1 m<sup>2</sup> pendant 24 h, activité habituellement consignée par les stations de surveillance. La pluviométrie est également relevée. L'activité prise en compte est celle des radionucléides artificiels exprimée en Bq m<sup>-2</sup> et sans limites basses autres que celles liées à leur détection.

### **2.2 Passage des radionucléides du milieu physique à l'homme [4, 14, 16]**

L'évaluation de l'exposition est faite sur les 60 jours qui suivent le dépôt. Etant donné que ce dépôt s'élimine naturellement de la surface des végétaux avec une période allant de 15 à 30 jours [4, 16], cette durée correspond à 2 et 4 périodes (cf. 2.2.1 Milieu terrestre, période d'élimination). Elle prend en compte l'essentiel de l'exposition résultant du dépôt direct sur les végétaux (composants importants de l'alimentation).

Le cheminement des radionucléides entre les surfaces réceptrices et l'homme (Fig. 1), s'exerce dans un temps très court. Aussi, dans le modèle, les passages sol-végétaux et les recyclages intermédiaires pouvant exister dans les milieux terrestres et aquatiques n'ont pas été retenus et ne sont pas représentés dans ce schéma.

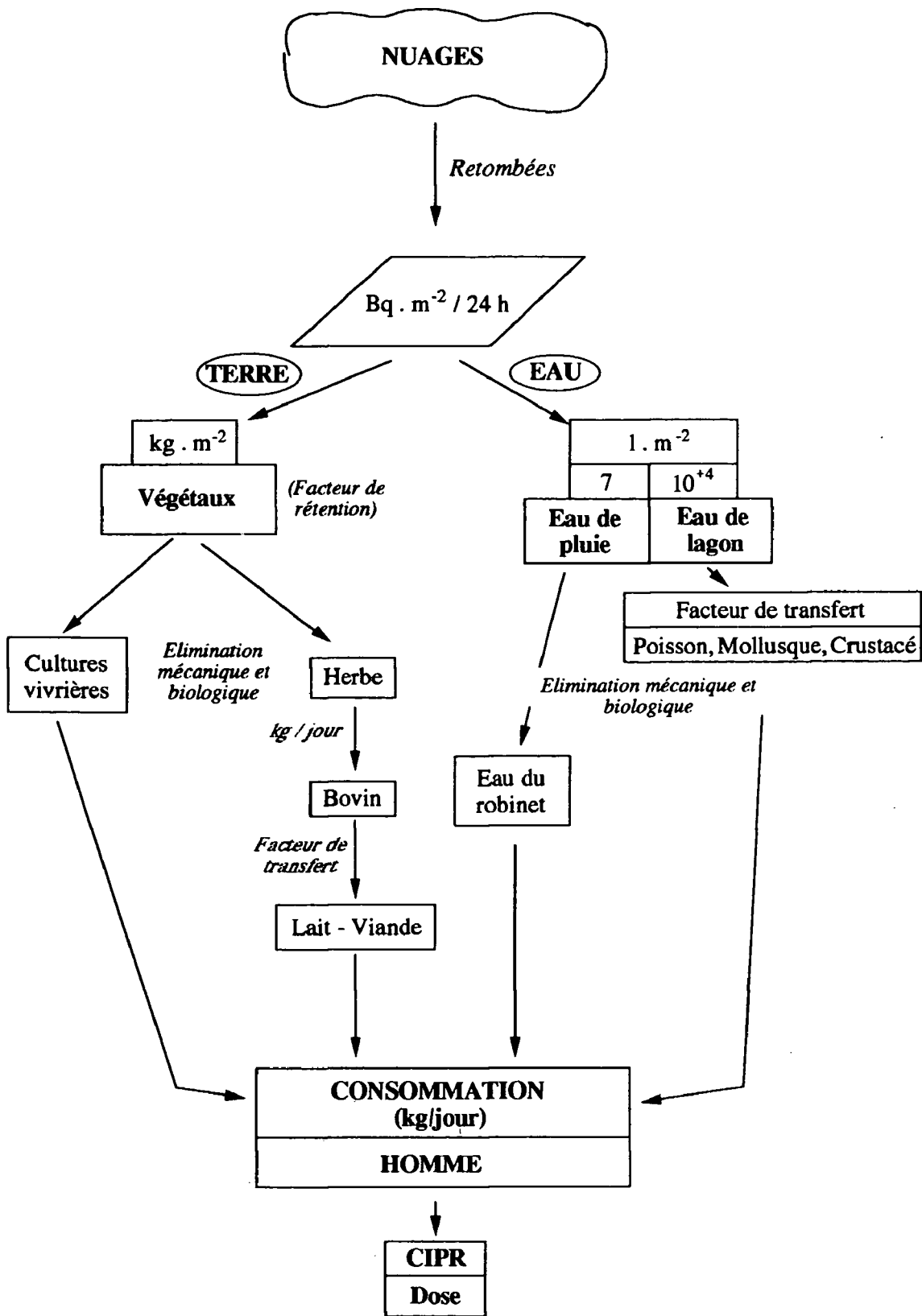


Fig. 1 – Schéma général du cheminement des radionucléides à travers la chaîne alimentaire à court terme.

Schematic diagram illustrating the short-term pathway of radionuclides through the food chain.

Les surfaces réceptrices sont :

- pour l'alimentation issue du milieu terrestre, le feuillage des végétaux,
- pour l'alimentation en eau, le sol qui recueille l'eau de pluie nécessaire à la boisson,
- pour les produits de la mer, la surface des lagons.

La figure 1 distingue les vecteurs solides (végétaux) et aqueux permettant le cheminement des radionucléides entre les surfaces réceptrices et l'homme.

Le terme "terre" regroupe les végétaux directement consommés par l'homme (cultures vivrières) et l'herbe alimentant les bovins producteurs de lait et de viande ; la mention  $\text{kg m}^{-2}$  indique le rendement des végétaux retenus pour le calcul. L'estimation de la quantité de radionucléides parvenant directement à l'homme par les cultures vivrières est faite en utilisant le facteur de rétention à la surface du végétal, la période d'élimination mécanique et biologique et, pour certains types de productions, le rapport surfacique et le facteur de translocation. Pour la voie "bovin", un facteur de transfert est utilisé entre l'herbe, le lait et la viande. Les paramètres cités précédemment sont définis ci-dessous (cf. 2.2.1).

Le terme "eau" regroupe l'eau de pluie directement utilisée par l'homme et l'eau de mer du lagon ; la mention  $\text{l m}^{-2}$  pour l'eau de pluie fait référence à la pluviométrie journalière et pour l'eau du lagon au volume moyen d'eau de mer correspondant à  $1 \text{ m}^2$  en surface. L'eau de pluie lessive la surface du sol, et les radionucléides subissent, entre leur lieu de dépôt et le robinet, une élimination partielle quantifiable par l'emploi d'une période d'élimination mécanique, période définie ci-dessous (cf. 2.2.1 Milieu terrestre, eau de boisson).

Les radionucléides déposés à la surface du lagon se dispersent uniformément dans tout le volume occupé par celui-ci. Ainsi, l'activité des poissons, mollusques et crustacés consommés par l'homme est obtenue par l'application, à chaque espèce, d'un facteur de transfert (eau-animal marin) et d'une période d'élimination mécanique et biologique de l'animal et de son milieu. Ces deux paramètres et le rendement surface-eau de mer sont définis ci-dessous (cf. 2.2.2).

En résumé, selon la figure 1, à court terme, les radionucléides arrivent à la ration alimentaire de l'homme par quatre chemins différents, dont deux sont directs. Pour chaque type d'aliments, l'activité est intégrée pendant 60 jours. A la base du schéma la mention "consommation ( $\text{kg/jour}$ )" marque le calcul de l'activité ingérée, et "CIPR" l'introduction du facteur de dose par ingestion servant à la détermination de la dose engagée.

### 2.2.1 Milieu terrestre

- Le rendement des cultures vivrières et des herbages est exprimé en  $\text{kg m}^{-2}$  [1, 4].

– *Le facteur de rétention à la surface des végétaux* [4] est un facteur sans dimension inférieur à 1 ; il a 2 valeurs suivant que le dépôt s'effectue par temps sec ou humide.

– *Le rapport surfacique* est le rapport entre la surface des parties aériennes consommées et la surface totale des parties aériennes du végétal. Ce rapport s'applique aux fruits et légumes-fruits [6]. Il est de 1 pour les légumes feuilles.

– *Le facteur de translocation* [4, 5] exprime par un taux la fraction de l'activité déposée qui migre des parties aériennes vers les organes de réserve consommés. Il est appliqué aux fruits, aux légumes-fruits et aux légumes-racines. Sa valeur varie suivant le ou les groupes de radioéléments. Les études sur cette migration dans les végétaux étant rares, les données sont statistiquement peu fiables.

– *La période d'élimination mécanique et biologique, in situ* [3, 14]

Exprimée en jours, c'est le temps nécessaire à l'élimination de la moitié de la quantité du radionucléide initialement présente dans le végétal ; cette période entre dans la détermination de la période effective de décroissance du radionucléide ( $T_e$ ), période permettant de calculer l'intégrale de l'activité présente pendant un temps donné :

$$1/T_e = 1/PRAD + 1/TEBE ; T_e = PRAD \times TEBE / PRAD + TEBE$$

*PRAD* est la période radioactive du radioélément,

*TEBE* est la période d'élimination mécanique et biologique (elle ne doit plus être prise en compte après la récolte).

Pour un type ou un groupement de végétaux et d'animaux, la période d'élimination peut être commune à des radioéléments présentant une certaine similitude chimique et physico-chimique.

– *Le facteur de transfert à l'équilibre* [1, 6]

*Herbe-lait-viande* : ce facteur relie, pour un radionucléide, l'activité spécifique du produit issu de l'animal à l'activité ingérée par celui-ci pendant une journée, il est exprimé en jour par kilogramme pour la viande et en jour par litre pour le lait.

Les aliments de complément (animaux) issus le plus souvent d'une autre région et habituellement en stock chez l'éleveur ne sont pas pris en compte, l'activité de ce type d'aliment étant trop faible en regard de celle des herbages de la zone contaminée.

*L'eau de boisson*

En 24 h et par mètre carré, le sol reçoit (théoriquement) un volume d'eau égal au cumul des eaux de pluie sur un an divisé par 365 jours (en litres par mètre carré par jour), soit  $7 \text{ l m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  à Papeete (Fig. 1) ;

Au contact du dépôt surfacique existant, l'eau qui sera consommée emporte une quantité de radionucléides difficilement mesurable. Aussi, devant cette impossibilité, une hypothèse pessimiste a été adoptée et le facteur de passage entre le dépôt et cette eau est fixé à 1. Le volume d'eau de pluie tombé en 24 h

par mètre carré contient ainsi toute la radioactivité du dépôt. Pendant son trajet entre la surface du sol et le robinet, l'eau traverse différents milieux physiques et perd une partie de sa radioactivité. Le modèle tient compte de cette perte par l'application à l'eau de boisson d'une période effective.

### 2.2.2 Milieu aquatique

*Rendement surface-ensemble du milieu physique :*

Pour l'eau de mer, les radionucléides recueillis en surface se diluent dans une colonne d'eau de 1 m<sup>2</sup> de section et de hauteur égale à la profondeur moyenne des lagons estimée à 10 m. Ce milieu contient la plupart des animaux marins consommés. Le rendement retenu est 10<sup>4</sup> l m<sup>-2</sup>.

*Facteur de transfert à l'équilibre [5, 8, 13]*

Contrairement au milieu terrestre (facteur de transfert aux produits animaux), ce facteur est issu du rapport de l'activité de l'animal marin considéré à celle de l'eau où il vit, ce rapport est exprimé en litre par kilogramme.

*- Période d'élimination mécanique et biologique [17]*

Si l'on suppose l'existence d'une diffusion rapide des radionucléides dans le milieu marin, les animaux y séjournant tendent, par des échanges permanents avec ce milieu, vers un équilibre, ceci nous incite à prendre pour période d'élimination celle de l'ensemble des milieux physique et vivant, cette période est exprimée en jours.

### 2.2.3 Consommation [9]

La consommation des aliments est exprimée en kilogramme par jour.

## 3. Calcul de la dose ingérée par la population pendant les 60 premiers jours suivant la retombée

Les abréviations employées dans le modèle exposé ci-dessous le sont également dans le logiciel de calcul.

### 3.1 Modèle retenu

Pour chaque type d'aliment l'activité intégrée pendant ces 60 jours, *ACTAL*, est exprimée par l'intégrale :

$$ACTAL = \int_{t=0}^{t=60} ACT \cdot e^{-\lambda e t} \cdot dt \quad (1)$$

*ACT* : activité transférée dans l'aliment au moment de la retombée ; ce terme sera défini pour chaque type d'aliment ci-dessous.

$\lambda e = 0,693/Te$  où *Te* est la période effective.

Pour alléger l'expression littérale,  $0,693/Te$  est remplacé par  $1/THO$ , où :

$$1/THO = (1/TEBE + 1/PRAD) \times 0,693$$

$TEBE$  est la période d'élimination biologique et mécanique du radionucléides,  $PRAD$  sa période de décroissance physique.

Après intégration de (1),  $ACTAL$  est exprimé par :

$$ACTAL = ACT \cdot THO (1 - e^{-60/THO}) \quad (2)$$

*Expression de ACT*

- *Végétaux*

L'expression de  $ACT$  formulée ci-dessous est appliquée aux végétaux consommés par l'homme et à l'herbe consommée par les bovins.

$$ACT = DEPOT \cdot RZ \cdot 1/R (RSURF + (1 - RSURF) FLOC)$$

$DEPOT$  : dépôt au sol

$RZ$  : facteur de rétention

$R$  : rendement

$LOC$  : facteur de translocation

$RSURF$  : rapport surfacique

Dans le cas de l'herbe :  $RSURF = 1$  et  $FLOC = 0$

- *Lait et viande de bovin :*

$$ACT = DEPOT \cdot RZ \cdot 1/R \cdot CQ \cdot FTRANS$$

$CQ$  : ration quotidienne de la vache

$FTRANS$  : facteur de transfert au lait ou à la viande (becquerel par litre ou par kilogramme, par becquerel ingéré par jour par la vache).

- *Eau de boisson :*

$$ACT = DEPOT \cdot 1/R$$

$R$  : rendement, soit le nombre de litres d'eau de boisson produits par un mètre carré du sol en une journée en moyenne.

- *Poissons et fruits de mer*

$$ACT = DEPOT \cdot 1/R \cdot FTRANS$$

$R$  : rendement, soit le nombre de litres d'eau de mer contenus dans la colonne d'eau sous-marine correspondant à  $1 \text{ m}^2$  à la surface du lagon.

$FTRANS$  : facteur de transfert de l'eau de mer aux poissons et fruits de mer (en  $l \text{ kg}^{-1}$ ).

### 3.2 Dose engagée [11]

Pour chaque type d'aliment consommé la dose engagée (DOSE) :

$$DOSE = ACTAL \cdot e^{-\lambda t_{STOCK}} \cdot CQ \cdot FACDOSE$$

*ACTAL* : activité intégrée exprimée dans l'expression (2)

La décroissance radioactive de l'aliment durant le stockage est exprimée par  $e^{-\lambda t}$  où  $\lambda t = 0,693/PRAD$ , expression simplifiée dans le programme de calcul en :  $0,693/PRAD = 1/TAU$ .

*PRAD* : période de décroissance physique du radioélément

*TSTOCK* : durée de stockage de l'aliment

*CQ* : consommation quotidienne par l'homme

*FACDOSE* : facteur de dose par ingestion.

### **3.3 Résultats affichés sur l'écran en fin de calcul**

– L'équivalent de dose engagé par ingestion pendant 60 jours regroupant tous les aliments et tous les radionucléides détectables ; dose efficace ou dose à l'organe suivant le choix des paramètres (*FACDOSE*).

– L'équivalent de dose engagé par ingestion pendant 60 jours par radionucléide et par groupe d'aliments.

– L'activité intégrée sur 60 jours par radionucléide et par groupe d'aliments.

## **4. Discussion**

Habituellement l'exploitant d'un site nucléaire contrôle les rejets atmosphériques en étant à même d'évaluer leur impact sur la population résidant à la proche périphérie du site (10 km). Le code de calcul qu'il utilise prend, comme terme source, les mesures effectuées à l'émission ; ceci est judicieux car, sur de courtes distances et en dehors de certaines situations particulières tel le bord de mer ou une instabilité passagère de l'air, l'atmosphère peut être considérée comme homogène [2]. Les trajectoires des polluants sont alors établies à l'aide de calculs simples, ce qui lui permet d'intervenir très rapidement après l'émission pour prévenir, en première urgence, l'irradiation externe et l'inhalation de composés radioactifs.

Le logiciel présenté ici évalue la dose ingérée par la population à partir de relevés quotidiens des dépôts au sol, fournis par la surveillance radioactive. Lors d'un rejet atmosphérique cette méthode permet de s'affranchir du terme source et d'estimer rapidement, sans préjuger de l'origine du rejet, l'importance des conséquences sanitaires futures .

L'intervention, si elle doit avoir lieu, se limite à la modulation de la consommation alimentaire et ne peut être effective, au mieux, que 24 h après le début de la retombée, temps nécessaire à la constitution du dépôt surfacique.



## 5. Conclusion

En cas de rejets radioactifs accidentels, la première urgence est de soustraire la population aux atteintes dues au passage du panache. Cette décision ne peut être rapidement prise qu'après consultation des mesures effectuées à l'émission. La deuxième urgence est l'évaluation des conséquences immédiates sur la chaîne alimentaire afin de limiter ou d'interdire, s'il y a lieu, la consommation de certaines denrées. L'apport direct dû au passage du panache étant la principale voie de contamination des aliments, l'activité surfacique mesurée après 24 h de dépôt est retenue pour le calcul de la dose ingérée par la population à l'issue des soixante premiers jours d'exposition ; cette durée équivaut à deux ou quatre périodes d'élimination mécanique des radionucléides à la surface des végétaux

Le logiciel d'exécution de ce calcul a été orienté vers une facilité d'accès aux paramètres spécifiques locaux, une grande convivialité et une utilisation sur tout PC fonctionnant sous système d'exploitation MS.DOS ; ces trois qualités permettent une grande rapidité lors de l'emploi de ce logiciel. ■

## RÉFÉRENCES

- [1] BONGARS F. – Contribution à l'étude de l'élevage laitier à Tahiti : conséquence économiques. Thèse de doctorat vétérinaire, Créteil, 1979.
- [2] BISCAY P., MICHELIN J.M., MOUSSAFIR J. – Evaluation des conséquences radiologiques d'un accident nucléaire. Le projet ECRAN de l'EDF. *In* : Impact des accidents d'origine nucléaire sur l'environnement, 4<sup>e</sup> symposium international de radioécologie, Cadarache, 14-18 mars 1988. CEN Cadarache : IPSN/SERE, 1988, F59-F77.
- [3] COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Direction des techniques avancées, Département des applications et de la métrologie des rayonnements ionisants (DAMRI). Radionucléides. Gif sur Yvette : CEA, 1991.
- [4] COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE (Département de Protection), NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD (NRPB) – Méthodologie pour l'évaluation des conséquences radiologiques des rejets d'effluents radioactifs en fonctionnement normal. Luxembourg : Commission des communautés européennes, 1979, p. 115, tabl. 3.15.
- [5] COUGHTRY J., JACKSON D.J. – Radionuclide distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems. Rotterdam : A.A. Balkema, 1985, vol. 6, p. 175.
- [6] COULON R. – Voie de contamination des produits alimentaires et conséquences pour l'homme. *In* : Actes du groupe de réflexion sur la contamination radioactive de la chaîne alimentaire, Paris, 6-11 juin 1987. Paris : Fondation française pour la nutrition, 1989, 42-62.
- [7] DESPRES A. – L'accident de Tchernobyl : difficultés de la comparaison des modèles et des mesures. *In* : Radiation protection practice, 7 IRPA international congress, Sydney, 10-17 April 1988. Sydney : Pergamon press, 1988, vol. I, 491-494.
- [8] ÉTATS-UNIS, Nuclear regulatory commission (NRC) – Calculation of annual doses to man from routine releases of reactor effluents for the purpose of evaluating compliance with 10 CFR Part 50, revision 1. (Regulatory guide 1.109). Washington : NRC, 1977, 1109-1113, Tabl. a-1.

- [9] GROUZELLE C., DOMINIQUE M., LAFAY F., DUCOUSSO R. – Résultats d'une enquête alimentaire effectuée à Tahiti de 1980 à 1982. Rapport CEA-R-5304, 1985.
- [10] HOFFMAN F.O., BERGSTRÖM U., GYLLANDER C.H., WILKENS A.B. – The transfer of  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  through terrestrial food chains, a comparison of model predictions. Rapport STUDEVIK/NW-83/417, 1983.
- [11] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP) – Limits for intakes of radionuclides by workers (ICRP publication 30, suppl. to part 1). (Ann. ICRP, 1979, 3, (1/4). Oxford : Pergamon press.
- [12] LINSLEY G.S., SIMMONDS J.R., HAYWOOD S.M. – FOOD-MARC : the foodchain transfer module in the methodology for assessing the radiological consequences of accidental releases. Rapport NRPB-M76, 1982.
- [13] MEYER J., DUCOUSSO R. –  $^{137}\text{Cs}$  des poissons de haute-mer du Pacifique sud entre 1976 et 1980. *In* : Service de Santé des Armées. Travaux scientifiques. 1981. Rapport SSA, 1982, n°3.
- [14] MILLER C.W., HOFFMAN F.O. – An examination of the environmental half-time for radionuclides deposited on vegetation. *Health Phys.*, 1983, 45, 731-744.
- [15] MÜLLER H., PRÖL G. – ECOSYS-87 : a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. *Health Phys.*, 1993, 64, 232-252.
- [16] PAULIN R., RINALDI., MONIER C., PAOLETTI S., BARONE R., BOUTEILLE H. – Impact radiologique de l'accident de Tchernobyl sur la population de la région PACA par l'intermédiaire des denrées alimentaires. *In* : Impact des accidents d'origine nucléaire sur l'environnement, 4<sup>e</sup> symposium international de radioécologie, Cadarache, 14-18 mars 1988. CEN Cadarache : IPSN/SERE, 1988, E84-E91.
- [17] UEDA T. NAKAMURA R., NAKAHARA M., SUZUKI Y., ISHII T. – Simulation of radioactivity in a semi-closed type bay. *In* : Impact des accidents d'origine nucléaire sur l'environnement, 4<sup>e</sup> Symposium international de radioécologie, Cadarache, 14-18 mars 1988. CEN Cadarache : IPSN/SERE, 1988, C107-C112.