

**ISIM**



DOCUMENT  
n° 23977

## Rapport de Projet Industriel de Fin d'Etude

# Approche du transport des dépôts terrestres de $^{137}\text{Cs}$ vers les indicateurs aquatiques.

*Valentin Claeys*

Réalisé du 29/11/99 au 31/01/2000 à  
Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire  
Département de Protection de l'Environnement  
Service d'Etudes et de Recherches radioécologiques dans les milieux Naturels  
Laboratoire d'Etudes Radioécologiques Continentales et de la Méditerranée

Sous la responsabilité de *Françoise Vray*

## I. Avant-propos.

Créé en 1959 par le général De Gaulle, le C.E.A. (*Commissariat à l'Énergie Atomique*) est implanté sur différents sites, notamment celui de Cadarache, à la confluence du Verdon et de la Durance dans les Bouches-du-Rhône sur un domaine de 1600 hectares. Il accueille des réacteurs expérimentaux, des laboratoires spécialisés, des ateliers et halls d'essais destinés aux recherches sur l'énergie nucléaire sous de multiples facettes. Cadarache constitue le premier centre C.E.A. hors de la région parisienne, tant par ses effectifs (une population de 5000 personnes ingénieurs et techniciens) que par son poids économique (2,5 milliards de francs de budget) et son impact régional.

L'I.P.S.N. (Institut de Sûreté et de Protection Nucléaire) possède plusieurs unités installées sur le site de Cadarache. Cet institut a pour vocation d'effectuer des recherches en sûreté et radioprotection, des expertises au profit des autorités, de préparer des moyens d'évaluation pour les situations de crise, et d'identifier les voies d'amélioration possibles de la sûreté à moyen et long terme. Au sein de l'I.P.S.N. le Département de Protection de l'Environnement (D.P.R.E.) s'occupe notamment des études et des recherches en radioécologie, c'est à dire de l'étude des interactions entre la radioactivité et l'environnement, en particulier l'impact des installations nucléaires sur l'homme et son environnement.

Le Service d'Etudes et de Recherches radioécologiques dans les milieux Naturels (S.E.R.N.A.T.) a pour mission de rassembler et développer les données et les outils nécessaires à la connaissance de la contamination radioactive du territoire français et d'étudier son évolution. Son activité est basée essentiellement sur l'étude des milieux naturels.

Le SERNAT regroupe:

- le Laboratoire de Mesure de la Radioactivité dans l'Environnement (LMRE).
- le Laboratoire d'Etudes Radioécologiques de la façade Atlantique (LERFA)
- le Laboratoire d'Etudes Radioécologiques Continentales et de la Méditerranée (LERCM).

Je tiens à remercier en premier lieu Françoise Vray qui a accepté de diriger ce travail. Sa grande disponibilité, ses conseils et sa rigueur dans le raisonnement ont été pour moi de précieux encouragements. Elle a été tout au long de cette étude l'interlocuteur averti de la plupart des discussions et des résultats qui vont suivre. Je lui adresse une profonde et sincère gratitude.



## II. Sommaire.

I. Avant-propos.....	1
II. Sommaire .....	3
III* Introduction .....	S
IV • Données étudiées.....	6
A. PRÉLÈVEMENTS .....	6
1. Les sédiments.....	6
2. Les végétaux aquatiques.....	6
B. TRAITEMENTS.....	6
1. Les sédiments.....	6
2. Les végétaux aquatiques.....	6
C. MÉTHODE DE MESURE DE LA RADIOACTIVITÉ .....	7
D. GESTION DES DONNÉES.....	7
E. LE CÉSIUM-137 .....	8
V. Synthèse sur les modélisations des transferts du sol vers l'eau.....	9
A. LES MODÈLES D'ÉROSION .....	9
a) Modèle de Fournier (CEMAGREF, 1982).....	9
b) Modèle utilisé par Moss et Walker (1978).....	10
c) Modèle utilisé par Foster et Hakonson (1984).....	10
B. LES MODÈLES SYSTÉMIQUES .....	11
a) Le modèle utilisé par Thomas (1988).....	11
b) Le modèle utilisé par Monte (1993 et 1995).....	12
C. LE MODÈLE RETENU.....	Id
VI. Calculs préalables à la mise en œuvre du modèle.....	IS
A. LES SÉDIMENTS .....	IS
1. Les mécanismes .....	IS
2. Caractérisation des échantillons.....	IS
B. LES BIOINDICATEURS.....	16
1. Expressions utilisées : notion de facteur de concentration .....	17
2. Problèmes liés au pas de temps de l'étude : notion de cinétique de réponse des indicateurs .....	17
a) Les phanérogames immergées.....	18
(1) Les myriophylles.....	18
(2) Les potamots .....	18
b) Les mousses aquatiques.....	19
VII. Détermination des paramètres.....	20
VIII. Conclusion.....	23
IX. Références bibliographiques.....	25
X. Annexes .....	26
A. ANNEXE 1 : RAPPEL SUR LA RADIOACTIVITÉ.....	27
B. ANNEXE 2 : LE CÉSIUM-137 .....	28
1. L'élément.....	28
2. ses origines.....	28
a) Le cycle du combustible nucléaire .....	28
b) Les explosions nucléaires.....	29

c) L'accident de Tchernobyl. ....	29
3. <i>Sa situation dans l'environnement</i> .....	<b>29</b>
C. ANNEXE 3 : LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE CREYS-MALVILLE.....	31
D. ANNEXE 4 : ETUDE DES DÉPÔTS .....	32
1. <i>Les dispersions atmosphériques</i> .....	<b>J 2</b>
2. <i>Etude des bassins versants à l'aide de Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.)</i> .....	32
3. <i>Concentrations dans les sols</i> .....	<b>J J</b>
E. ANNEXE 5 : DÉBITS MOYENS JOURNALIERS (DONNÉES BRUTES).....	35
1. <i>Débits du Rhône en <math>m^3.s^{-1}</math> à Pont de Lagnieu, Creys-Malville</i> .....	35
2. <i>Débits de la Meuse en <math>m^3.s^{-1}</math> à Chooz</i> .....	36
3. <i>Débits de la Moselle en <math>m^3.s^{-1}</math> à Cattenom</i> .....	37
F. ANNEXE 6 : DONNÉES SOURCES DE $^{137}\text{Cs}$ UTILISÉES .....	39
1. <i><math>^{137}\text{Cs}</math> dans les bioindicateurs</i> .....	39
2. <i><math>^{137}\text{Cs}</math> dans les sédiments</i> .....	d0
G. ANNEXE 7 : VARIABILITÉ DES DÉBITS DU RHÔNE À PONT DE LAGNIEU, CREYS-MALVILLE.....	42
H. ANNEXE 8 : EVOLUTION DU $^{137}\text{Cs}$ DANS LES PHANÉROGAMES IMMERGÉES ET DU DÉBIT JOURNALIER MOYEN.....	43
I. ANNEXE 9 : PRÉSENTATION DES ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES ....	<b>J S</b>
J. ANNEXE 10 : TEST STATISTIQUE SUR LA FIABILITÉ DES RÉSULTATS. ....	46

### III. Introduction.

Le LERCM s'intéresse à l'origine et au devenir des radionucléides naturels ou artificiels présents dans les différents compartiments des écosystèmes continentaux et méditerranéens.

Il prend en charge les missions de prélèvement sur le terrain ainsi que le traitement et le conditionnement des échantillons qui sont ensuite envoyés au laboratoire de métrologie. Après réception des résultats de mesure, il analyse les données recueillies. Celles-ci sont relatives aux milieux terrestre et aquatique continental, surtout, mais pas exclusivement, dans le champ proche des installations nucléaires.

Afin d'évaluer les conséquences d'apports de radionucléides quels qu'ils soient (rejets d'installations ou dépôts d'origine plus lointaine), il est nécessaire de bien connaître et quantifier les mouvements de ces radionucléides entre les différentes composantes des écosystèmes, par exemple entre les sols et les cours d'eau. Ces derniers sont en effet les vecteurs privilégiés de matières particulaires issues de l'érosion mécanique, mais aussi de substances dissoutes.

C'est dans ce contexte qu'a été défini le sujet de ce stage, dont l'objectif est d'améliorer les connaissances des flux de radioactivité, en cherchant à quantifier les transferts de radionucléides présents dans les sols vers les cours d'eau à l'aide de mesures sur des bioindicateurs et des sédiments.

Les données disponibles déterminent les limites du travail qui a pu être réalisé au cours de ce stage. Elles sont donc décrites ainsi que leurs méthodes d'acquisition, qui ont également été étudiées et appliquées (mission d'une semaine sur le terrain).

Une analyse bibliographique sera ensuite présentée afin de donner les grands principes des modèles empiriques opérationnels utilisés pour traiter de ce type de transferts. Elle débouchera sur la présentation du modèle retenu et de ses paramètres, lesquels seront ensuite calibrés. Après analyse des résultats obtenus, les perspectives d'élargissement de ce travail seront évoquées.

sur les rivières Ukrainiennes et le Rhin, mais significativement supérieures à celle estimée par Hilton (1993) pour les apports de la rivière Devote à un lac ( $T_2=0,84$  ans).

Les valeurs obtenues au cours de ce travail tendent à être légèrement supérieures à celles présentées par Monte et Hilton, même si cette tendance est peu significative.

Deux éléments sont susceptibles d'intervenir dans ce sens :

un possible chevauchement des deux fonctions de transfert relatives au court et au long terme (les études précédentes portent sur des données antérieures aux nôtres) et l'origine du  $^{137}\text{Cs}$  : les retombées issues de Tchernobyl ont été plus importantes en Ukraine, où le stock pré-existant en  $^{137}\text{Cs}$  dû aux essais atmosphériques d'armes nucléaires des années 60 à 80 est en proportion totalement négligeable, alors qu'en France, ce stock peut représenter jusqu'à 20% du  $^{137}\text{Cs}$  total. Pour ces 20% le temps écoulé depuis l'apport est supérieur au temps écoulé depuis l'accident de Tchernobyl.

## VIII. Conclusion.

Une synthèse bibliographique montre que les modèles systémiques ou compartimentaux semblent adaptés à la description du transfert du  $^{137}\text{Cs}$  du sol vers des indicateurs aquatiques pour de grands bassins versants comme ceux sur lesquels sont implantées les centrales nucléaires françaises. À partir des données recueillies chaque année entre 1987 et 1998 sur ces indicateurs, il a été possible de tester l'un de ces modèles et d'estimer les valeurs de ses paramètres, qui sont d'une part la période de diminution des apports de  $^{137}\text{Cs}$  dans les cours d'eau, d'autre part l'influence du débit dans l'importance de ces apports.

La démarche adoptée semble intéressante puisque les résultats obtenus sont cohérents. On estime une période relativement homogène de décroissance des concentrations de  $^{137}\text{Cs}$  dans les cours d'eau (entre 2 et 18 ans). Elle est du même ordre de grandeur que celles évaluées par d'autres auteurs pour d'autres cours d'eau. Dans certains cas il semblerait qu'une partie des variations autour de cette tendance à la décroissance puissent être expliquées par les valeurs du débit du cours d'eau moyenné sur une durée adaptée.

La durée sur laquelle doit être calculé le débit moyen à intégrer dans le modèle semble dépendre de la nature de l'indicateur. Ainsi, les concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  mesurées dans les myriophylles apparaissent très corrélées au débit moyen sur les 9 jours précédant leur prélèvement. Dans le cas des potamots, le calcul d'un débit moyen sur au moins 25 jours semble mieux adapté. Les mousses aquatiques paraissent en revanche peu sensibles aux fluctuations de débit du cours d'eau. Ceci signifie que les différents indicateurs étudiés intègrent les fluctuations de la concentration du radionucléide dans le cours d'eau sur des durées plus ou moins longues.

pour les rivières Ukrainiennes et le Rhin, mais significativement supérieures à celle estimée par Hilton (1993) pour les apports de la rivière Devote à un lac ( $T_2=0,84$  ans).

Les valeurs obtenues au cours de ce travail tendent à être légèrement supérieures à celles présentées par Monte et Hilton, même si cette tendance est peu significative. Deux éléments sont susceptibles d'intervenir dans ce sens :

- un possible chevauchement des deux fonctions de transfert relatives au court et au long terme (les études précédentes portent sur des données antérieures aux nôtres)
- l'origine du  $^{137}\text{Cs}$  : les retombées issues de Tchernobyl ont été plus importantes en Ukraine, où le stock pré-existant en  $^{137}\text{Cs}$  dû aux essais atmosphériques d'armes nucléaires des années 60 à 80 est en proportion totalement négligeable, alors qu'en France, ce stock peut représenter jusqu'à 20% du  $^{137}\text{Cs}$  total. Pour ces 20% le temps écoulé depuis l'apport est supérieur au temps écoulé depuis l'accident de Tchernobyl.

## VIII. Conclusion.

Une synthèse bibliographique montre que les modèles systémiques ou compartimentaux semblent adaptés à la description du transfert du  $^{137}\text{Cs}$  du sol vers des indicateurs aquatiques pour de grands bassins versants comme ceux sur lesquels sont implantées les centrales nucléaires françaises. À partir des données recueillies chaque année entre 1987 et 1998 sur ces indicateurs, il a été possible de tester l'un de ces modèles et d'estimer les valeurs de ses paramètres, qui sont d'une part la période de diminution des apports de  $^{137}\text{Cs}$  dans les cours d'eau, d'autre part l'influence du débit dans l'importance de ces apports.

La démarche adoptée semble intéressante puisque les résultats obtenus sont cohérents. On estime une période relativement homogène de décroissance des concentrations de  $^{137}\text{Cs}$  dans les cours d'eau (entre 2 et 18 ans). Elle est du même ordre de grandeur que celles évaluées par d'autres auteurs pour d'autres cours d'eau. Dans certains cas il semblerait qu'une partie des variations autour de cette tendance à la décroissance puissent être expliquées par les valeurs du débit du cours d'eau moyenné sur une durée adaptée.

La durée sur laquelle doit être calculé le débit moyen à intégrer dans le modèle semble dépendre de la nature de l'indicateur. Ainsi, les concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  mesurées dans les myriophylles apparaissent très corrélées au débit moyen sur les 9 jours précédant leur prélèvement. Dans le cas des potamots, le calcul d'un débit moyen sur au moins 25 jours semble mieux adapté. Les mousses aquatiques paraissent en revanche peu sensibles aux fluctuations de débit du cours d'eau. Ceci signifie que les différents indicateurs étudiés intègrent les fluctuations de la concentration du radionucléide dans le cours d'eau sur des durées plus ou moins longues.

Les résultats obtenus ont cependant une portée statistique extrêmement faible. Pour effectuer une démonstration statistiquement valide des tendances observées, il serait nécessaire de disposer de séries de données beaucoup plus riches : augmenter la longueur de ces séries jusqu'à une bonne douzaine d'années permettrait de quantifier la décroissance de l'activité du radiocésium dans les cours d'eau avec plus de précision, et augmenter leur densité en réalisant des prélèvements saisonniers permettrait de mieux expliquer la variabilité autour de la décroissance générale.