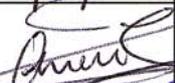
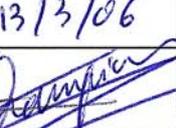


IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Projet SENSIB

Rapport d'avancement 2005

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION
Service d'Etude et de Surveillance
de la Radioactivité
dans l'Environnement

Demandeur					
Référence de la demande					
Numéro de la fiche programme					
<h1>Projet SENSIB</h1> <h2>Rapport d'avancement 2005</h2> Laboratoire d'Etudes Radioécologiques Continentales et Marines Rapport DEI/SESURE n°06-02					
	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur*	Chef du SESURE	Directeur DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	C. MERCAT	P. RENAUD	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	20/12/05	5/01/06	8/3/06	13/3/06	
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
0	20/12/05	C. MERCAT	Création	
1	02/02/06	C. MERCAT		Prise en compte des remarques de N. Lemaitre et F. Marot (ADEME)

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme
C. MERCAT (chef de projet)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
O. MASSON (dépôt)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
E. BOIS (dépôt)	Stagiaire
L. POURCELOT (sol)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
N. SOLOVITCH-VELLA (sol)	Post-doctorante
F. EYROLLE (berges)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
J. VILLIET (berges)	Stagiaire
C. DUFFA (érosion)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
F. DANIC (érosion)	Intérimaire
F. VRAY (érosion / enquête alimentaire)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
B. BRIAND (milieux agricoles)	Thésarde
A. DELBOE (milieux agricoles)	Stagiaire
C. VASSAS (Marcoule/La Hague)	Intérimaire
S. ROUSSEL-DEBET (Marcoule/La Hague)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
C. BAUDRIT (incertitudes)	Thésard
E. CHOJNACKI (incertitudes)	IRSN/DPAM/SEMIC/LMPC

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme
F. MAROT (2 exemplaires)	ADEME
J. REPUSSARD	IRSN/DIR
M. BRIERE	IRSN/DIR
M. BOUVET	IRSN/DSDRE
G. MONCHAUX	IRSN/DSDRE
A. SUGIER	IRSN/DSDRE
J. LEWI	IRSN/DESTQ
MP BIGOT	IRSN/COM
F. SOULET	DESTQ/DISCT/CRIS
A. OUDIZ	DSDRE/DSP
JC. BARESCUT	DSDRE/DSP
P. GOURMELON	DRPH/DIR
A. RANNOU	DRPH/SER
A. DESPRES	DRPH/SER/UETP
C. RINGEARD	DRPH/SER/UETP
D. CHAMPION	DEI/DIR
D. BOULAUD	DEI/DIR
B. DUFER	DEI/DIR
JM PERES	DEI/SARG
JC GARIEL	DEI/SECRE
P. DUBIAU	DEI/SESUC
JP. MAIGNE	DEI/SIAR
MC. ROBE	DEI/STEME
P. CALMON	DEI/SECRE/LME
B. DESCAMPS	DEI/SESURE/LESE
O. PIERRARD	DEI/SESURE/LVRE
P. RENAUD + un exemplaire par participant	DEI/SESURE/LERCM

RESUME

Ce rapport présente l'état d'avancement de l'ensemble des études qui constituent actuellement le projet SENSIB.

Le projet SENSIB reçoit une participation financière de l'ADEME (convention n° 0472C0035).

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	3
2 RAPPELS SUR LE PROJET SENSIB	3
3 LA SENSIBILITE DES TERRITOIRES AUX DEPOTS	7
3.1.1 OBJECTIFS	7
3.1.2 METHODOLOGIE	8
3.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	9
3.1.4 PREVISIONS POUR 2006-2008	10
4 LA SENSIBILITE DES SOLS	10
4.1 LA SENSIBILITE DES SOLS A LA MIGRATION VERTICALE	12
4.1.1 OBJECTIFS	12
4.1.2 Methodologie	12
4.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	12
4.1.4 PREVISIONS POUR 2006	13
4.2 LA SENSIBILITE DES SOLS A LA MIGRATION HORIZONTALE	14
4.2.1 Comparaison de bassins versants	14
4.2.1.1 OBJECTIFS	14
4.2.1.2 METHODOLOGIE	14
4.2.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	15
4.2.1.4 PREVISIONS POUR 2006	15
4.2.2 Etude in situ du bassin versant de La Peyne	15
4.2.2.1 OBJECTIF	15
4.2.2.2 METHODOLOGIE	15
4.2.2.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	16
4.2.2.4 PREVISIONS POUR 2006	16
5 LA SENSIBILITE DES BERGES DE RIVIERES	17
5.1 OBJECTIF	17
5.2 METHODOLOGIE	17
5.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	18
5.4 PREVISIONS POUR 2006	18
6 LA SENSIBILITE DES PRODUCTIONS AGRICOLES	18
6.1 CAS DE LA SENSIBILITE DES PRODUCTIONS CEREALIERES A UN REJET ACCIDENTEL	18
6.1.1 OBJECTIF	18
6.1.2 METHODOLOGIE	18
6.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	19
6.1.4 PREVISIONS POUR 2006	19
6.2 CAS DE LA SENSIBILITE DES LEGUMES A UN REJET CHRONIQUE	19

6.2.1 OBJECTIF	19
6.2.2 METHODOLOGIE	20
6.2.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	20
6.2.4 PREVISIONS POUR 2006	21
7 LA SENSIBILITE ANTHROPIQUE DES TERRITOIRES	21
7.1 OBJECTIF	21
7.2 METHODOLOGIE	21
7.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	22
7.4 PREVISION POUR 2006	22
8 ETUDE COMPARATIVE DE LA SENSIBILITE GLOBALE DE DEUX SITES	22
8.1.1 OBJECTIF	22
8.1.2 METHODOLOGIE	22
8.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	23
8.1.4 PREVISIONS POUR 2006	25
9 INCERTITUDES, COMMUNICATION, PERCEPTION ET REPRESENTATION	25
9.1.1 OBJECTIF	25
9.1.2 METHODOLOGIE	25
9.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005	26
9.1.4 PREVISIONS POUR 2006	26
10 CONCLUSION	26
11 BILAN DES CONTRIBUTIONS AU PROJET SENSIB EN 2005	27
11.1 RAPPORTS IRSN ET DOCUMENTS INTERNES	27
11.1.1 rapports Diffusés	27
11.1.2 rapports En cours de procédure AQ	27
11.1.3 autres documents produits en 2005	27
11.2 PUBLICATIONS ECRITES	28
11.3 CONGRES (POSTERS ET COMMUNICATIONS ORALES)	28
11.4 AUTRES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	29

1 INTRODUCTION

Après une phase de conceptualisation, de détermination de l'approche méthodologique et d'étude des enjeux et de la faisabilité (Mercat-Rommens et Renaud 2003, Mercat-Rommens et Renaud 2004), le projet Sensibilité radioécologique, SENSIB, est entré en phase de réalisation en 2005. Sous l'égide de SENSIB, plusieurs études ont été réalisées cette année dans les différents milieux de l'environnement avec pour trait d'union la recherche d'identification et de caractérisation des facteurs de sensibilité de l'environnement. Cette recherche constitue les premières étapes du projet SENSIB (Figure 1) et les résultats acquis en 2005 permettront dans les prochaines années de dérouler l'ensemble de la méthodologie du projet SENSIB jusqu'à l'obtention d'une échelle de sensibilité radioécologique qui permettra la classification du territoire français.

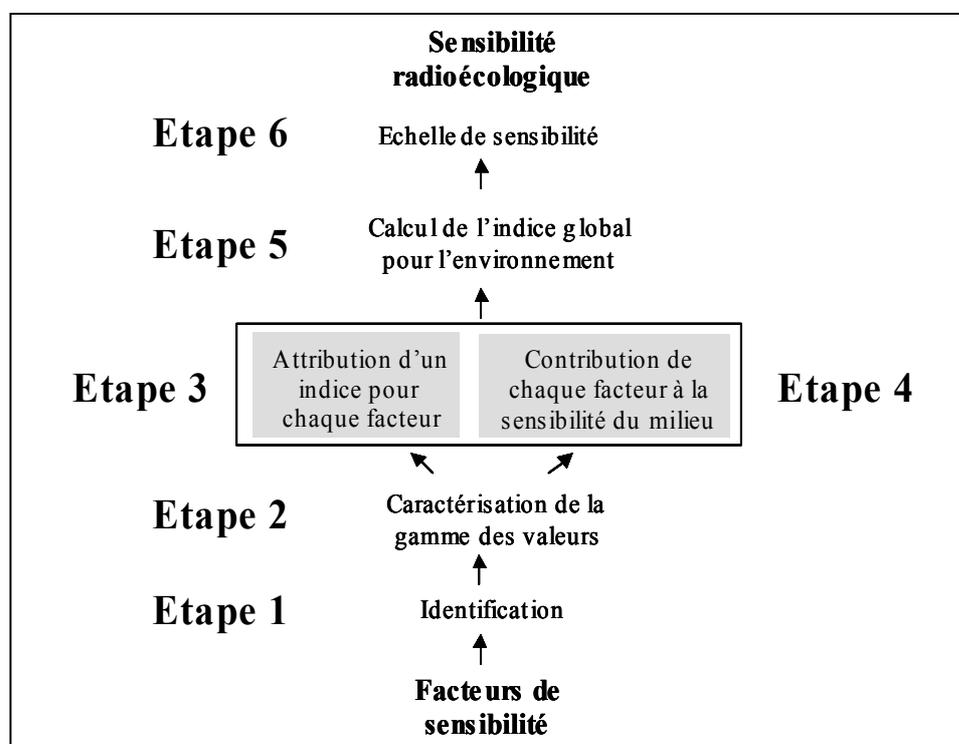


Figure 1 : Les étapes du projet SENSIB

2 RAPPELS SUR LE PROJET SENSIB

Les conséquences pour l'homme et pour l'environnement d'une pollution d'origine industrielle dépendent de l'importance et de la nature de la pollution, mais aussi de l'environnement qui la reçoit. Ces conséquences seront en effet plus ou moins pénalisantes suivant les caractéristiques du milieu touché et suivant l'usage qu'en fait l'homme. L'objectif du projet SENSIB, initié en 2004 par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, est de construire une méthode de classification du territoire français sur la base de ses

caractéristiques environnementales et sociétales. Le résultat attendu du projet SENSIB est un outil normalisé qui permette de représenter et de comparer sur une même échelle de valeur la sensibilité du territoire vis-à-vis d'une pollution radioactive. Cette normalisation des caractéristiques de l'environnement et des populations sera utilisable pour l'évaluation et la gestion des risques, à toutes les étapes de l'exploitation d'une installation nucléaire (avant la mise en exploitation, en fonctionnement normal, en situation accidentelle et post-accidentelle, lors du démantèlement).

Le concept de sensibilité de l'environnement peut être étendu à d'autres pollutions que la pollution radioactive et de nombreux enseignements du projet seront transposables à d'autres contextes et notamment aux cas de pollutions chimiques.

La connaissance de la sensibilité relative d'une surface nécessite d'étudier les facteurs qui déterminent cette sensibilité et qui sont susceptibles de la modifier, c'est à dire d'augmenter ou de diminuer les conséquences d'une pollution. Différents types de facteurs coexistent : les paramètres écologiques qui sont caractéristiques de l'écosystème mais indépendants du radionucléide, les paramètres radioécologiques qui dépendent du radionucléide, les paramètres anthropiques, ... Lors de l'étape de caractérisation des facteurs de sensibilité, les valeurs que peuvent prendre chacun de ces facteurs sont déterminées. Certains facteurs peuvent présenter une plage de variation. Par exemple le facteur « précipitations moyennes annuelles » peut varier en France de moins de 600 à plus de 1800 mm.an⁻¹. D'autres sont des facteurs catégoriels comme l'occupation du sol : habitation, forêt, pâturage, champ de blé...

Ce travail de caractérisation est effectué en s'appuyant d'une part sur des connaissances acquises tant en termes de jugements d'expert, qu'en termes de données recueillies sur le terrain (exploitation de la base de données SYLVESTRE de l'IRSN et acquisition de nouvelles données de terrain), et d'autre part sur des données bibliographiques élargies à d'autres disciplines au travers de collaborations avec d'autres organismes.

Pour chaque facteur de sensibilité, un indice, de 1 à 10 par exemple, sera associé précisant le caractère avantageux ou pénalisant des valeurs. Dans le cas du facteur « précipitations moyennes annuelles », l'indice sera d'autant plus élevé que la valeur de la précipitation moyenne sera forte, lorsqu'il traduira une augmentation des dépôts des polluants atmosphériques. Par contre, si les précipitations traduisent un lessivage d'une surface, l'indice pourra être diminué. Il apparaît donc que le système d'indilage peut être différent en fonction des enjeux.

Parallèlement, la contribution ou « poids » relatif de chaque facteur dans la sensibilité du milieu étudié, est déterminée par une étude de sensibilité sur la fonction qui va du rejet aux conséquences sanitaires, toxicologiques ou économiques. Cette contribution pourrait s'exprimer sous la forme de pourcentage. Par exemple, le facteur « précipitation moyenne annuelle » pourra avoir une contribution de 0,1, un facteur pédologique une contribution de 0,05, un facteur d'occupation du sol de 0,2 à la sensibilité du milieu considéré. Ce travail repose principalement sur l'utilisation de modèles de transferts des polluants dans les différents milieux.

La sensibilité de l'environnement sera alors déterminée par la combinaison des indices de chaque facteur pondéré par sa contribution. L'indice ainsi obtenu permet de comparer entre eux les milieux du point de vue de leur sensibilité. Plus l'indice obtenu sera élevé plus la sensibilité de l'environnement sera importante. La même méthode appliquée aux facteurs de sensibilité des populations permet le croisement de la sensibilité environnementale et sociétale et fournit donc la sensibilité globale d'un territoire.

L'analyse des moyens cartographiques utilisables et la spatialisation des résultats permettront ensuite l'obtention des cartes de sensibilité vis-à-vis d'un risque de pollution déterminé.

Enfin, une échelle de sensibilité sera élaborée pour standardiser les comparaisons des indices de sensibilité.

Le projet SENSIB est structuré en 5 étapes (Figure 1) : l'identification des facteurs de sensibilité, la caractérisation de leur gamme de valeur, la conversion des gammes de valeurs en gamme d'indice, l'évaluation du poids de chaque facteur de sensibilité à la sensibilité globale et le calcul de l'indice global en vue de définir une échelle de la sensibilité radioécologique. La réalisation de ces étapes nécessite préalablement de fédérer les données radioécologiques disponibles pour le projet (données de terrain, modélisation, résultats expérimentaux) et de les traiter avec une approche commune définie par le projet. Pour la période 2005-2008 (cofinancée par l'ADEME), les sujets du projet SENSIB sont traités soit dans le cadre d'études thématiques qui concernent les premières étapes du projet et dont les résultats constituent des briques pour bâtir l'ensemble de la méthode de classification de l'environnement vis à vis de la sensibilité à une pollution radioactive (approche horizontale - par milieu, correspondant à la flèche de droite de la figure 2), soit dans le cadre d'études applicatives pour lesquelles l'ensemble des étapes du projet est déroulé mais avec des objectifs limités à certains milieux de l'environnement ou à certains champs du risque (approche verticale - par scénario d'application, correspondant aux flèches de gauche de la figure 2). Pour 2005-2008, les milieux traités sont principalement l'atmosphère, le sol, les productions agricoles, le domaine fluvial et les deux scénarios d'application envisagés sont la gestion post-accidentelle d'un rejet et la sensibilité des sites nucléaires aux rejets chroniques des installations nucléaires.

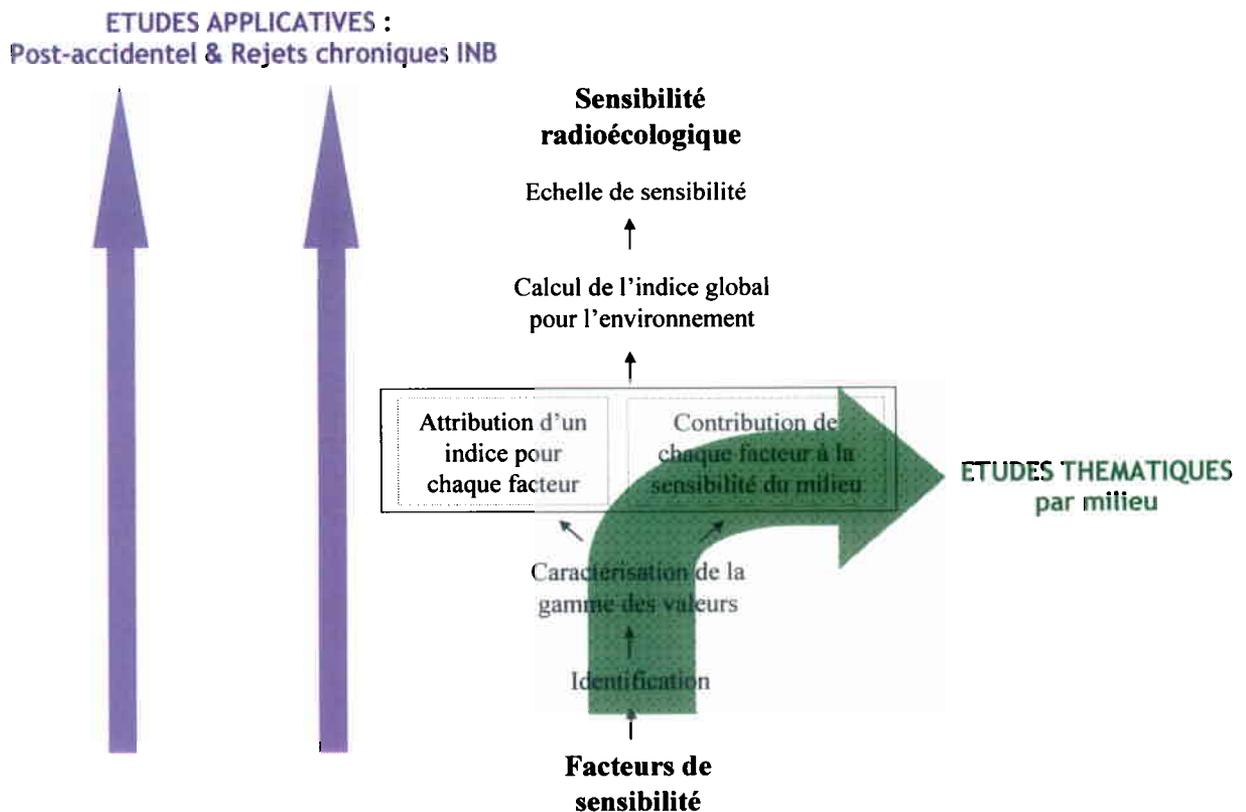


Figure 2 : Les études du projet SENSIB

L'évaluation de la sensibilité radioécologique du territoire français va inévitablement conduire aux calculs de différents indicateurs de la sensibilité : par exemple des activités massiques, des activités surfaciques, des activités totales « produites » sur une surface donnée et en un temps donné. Il faudra donc hiérarchiser ces indicateurs et trouver des moyens de les comparer entre eux. Habituellement, on utilise l'indicateur dosimétrique pour faire ce type de comparaisons mais on introduit alors des paramètres non environnementaux (utilisation des milieux, rations alimentaires, temps passé, coefficient de dose, ...). Dans le cadre du projet SENSIB, il est proposé d'explorer les méthodes d'analyses multicritères de type ELECTRE (Maystre *et al.* 1994) pour permettre des comparaisons et des tris des indicateurs de sensibilité radioécologique sans se ramener forcément à des indicateurs dosimétriques.

Les trois grandes étapes qui se succèdent dans le développement d'une méthode d'analyse multicritères sont les suivantes :

- La première grande étape est l'élaboration de la matrice des évaluations par laquelle chaque action est jugée selon chaque critère et chaque critère est éventuellement affecté d'un poids.
- La seconde étape est la réalisation de la procédure d'agrégation qui permet d'obtenir les préférences globales à partir de relations de surclassement déduites de la matrice

des évaluations. C'est lors de cette étape qu'il faut choisir quel type de méthode ELECTRE (I, II, TRI, ...) on utilise.

- La troisième étape est l'analyse de robustesse du résultat qui permet ensuite de tester si les résultats ne sont pas modifiés de façon importante quand les paramètres varient autour de leur valeur initiale et donc de savoir si la recommandation est robuste. Les paramètres que l'on peut faire varier sont : la gamme de valeur des critères (ou la notation si ce sont des critères qualitatifs), le poids des critères, le seuil de concordance et/ou le seuil de discordance). Une analyse de robustesse approfondie permet notamment de compenser le caractère subjectif de certains paramètres.

Par rapport à ces trois grandes étapes, le projet SENSIB en est actuellement à l'étape d'élaboration de la partie supérieure de la matrice des évaluations : valeur obtenue ou en cours d'obtention pour différents sites pour différents indicateurs de sensibilité. Les bornes de la matrice d'évaluation sont encore à définir (nombre total de critères/indicateurs de sensibilité à considérer). Pour chaque application du projet SENSIB (à ce stade du projet, deux applications sont en cours le post-accidentel et les rejets chroniques), un jeu de critères spécifiques doit être choisi et ce choix doit prendre en compte à terme l'avis de décideurs. En ce qui concerne la partie inférieure de la matrice des évaluations (poids des critères), l'avis de décideurs intervient une seconde fois dans la démarche. Dans un premier temps, l'exploration des méthodes multicritères dans le cadre de SENSIB pourrait être menée en interne en définissant un scénario de mise en œuvre d'une méthode ELECTRE (pour le post-accidentel, les rejets chroniques ou une sous-partie de ces domaines d'application : les milieux fluviaux, les milieux terrestres, ...) et en se substituant au décideur chaque fois qu'il faut faire un choix (nombre et définition des critères, poids éventuels des critères). Dans un deuxième temps, lorsque l'utilisation de la méthode sera clarifiée, il faudra envisager l'implication d'un ou plusieurs décideurs pour la finalisation de la méthode.

3 LA SENSIBILITE DES TERRITOIRES AUX DEPOTS

3.1.1 OBJECTIFS

Dans le cas d'une émission de polluants dans l'atmosphère, les conditions atmosphériques, en particulier les précipitations, ont un rôle déterminant dans la répartition des dépôts. En effet, même si les précipitations revêtent différentes formes (brouillard, bruine, pluie, averse, neige), elles ont toutes en commun une efficacité de rabattement au sol des polluants atmosphériques plus importante que celle qui se produit par temps sec. Pour tous les polluants, le rabattement est quantifié par un rapport entre l'activité de l'air et celle de l'eau de pluie qui s'exprime en Bq.l^{-1} par Bq.m^{-3} pour les polluants radioactifs et en mg.l^{-1} par mg.m^{-3} pour les autres polluants (sulfates, nitrates, métaux, ...). Ce rapport est également appelé rapport de lavage-lessivage de l'air par l'eau de pluie et noté W_r (Washout ratio) dans

la suite du rapport. En ce qui concerne les polluants radioactifs, le suivi régulier de la radioactivité dans l'air et dans les eaux de pluie est réalisé en routine sur des pas de temps de collecte mensuels. Longtemps abordées sous l'angle de valeurs moyennes, intégrées sur des pas de temps calendaires, les relations entre l'air, l'eau de pluie et les activités déposées ne permettent pas de refléter la variabilité des situations climatiques habituelles ou liées à des épisodes météo-climatiques particuliers (poussières désertiques, averses). De plus ce suivi ne permet pas toujours de distinguer les retombées sèches des retombées uniquement lors des précipitations.

Le volet d'études proposé dans le cadre du volet SENSIB-Atmo(sphérique) a pour objectif d'améliorer la caractérisation des dépôts, à l'échelle de chaque événement précipitant et non plus sur des pas de temps calendaires. Un intérêt particulier sera donc porté à l'approche individuelle des épisodes de précipitations afin de rendre compte le plus précisément possible de leur potentiel de lavage-lessivage et de sa variabilité. Ce travail fournira une classification des événements climatiques (type de masse d'air, type de précipitations,...) en fonction de leur potentiel de lavage-lessivage et permettra d'établir une cartographie de la sensibilité du territoire aux dépôts atmosphériques en fonction des caractéristiques régionales des pluies.

3.1.2 METHODOLOGIE

Ce travail comporte deux phases : une phase expérimentale qui porte sur la collecte d'échantillon de pluies et d'aérosols ainsi que sur la caractérisation des situations de pluies et une phase de modélisation qui s'appuie sur les résultats de la phase expérimentale pour proposer un modèle explicatif empirique.

L'étude expérimentale sera principalement réalisée au Puy de Dôme dans le cadre d'une thèse codirigée par le LAMP (Laboratoire de Météorologie Physique de l'atmosphère de l'Université de Clermont-Ferrand – UMR n°6016 du CNRS). Le Puy de Dôme se prête bien à l'étude des pluies océaniques et des pluies continentales car ce site est soumis tantôt à des précipitations océaniques, tantôt à des précipitations continentales. Le sommet du Puy de Dôme se prête également bien à l'étude du lavage de l'atmosphère au sein des nuages et autorise la collecte d'échantillons. Pour les besoins de l'étude, il est prévu de compléter les dispositifs de collecte actuellement en place sur le Puy de Dôme. Ces équipements permettront la collecte des aérosols permettant de caractériser la masse d'air avant et après la pluie ainsi que l'eau de la pluie à deux altitudes différentes : le sommet du Puy de Dôme et le site d'Opme situé environ 800 m en contrebas.

Les résultats de la phase expérimentale pourront être complétés et comparés avec les résultats qui seront obtenus en parallèle de la thèse sur d'autres sites connus pour le caractère typé des précipitations qu'ils subissent :

- Le site de Toulon pour les pluies typées méditerranéennes (intensité et rareté) qui se prête bien également au cas des atmosphères empoussiérées notamment lors d'épisodes de poussières sahariennes. Ces pluies seront étudiées en partenariat avec l'Université de Toulon-La Valette.

- Le site de Charleville-Mézières pour l'étude des bruines et des brouillards, en fonction de l'avancement de l'étude.

3.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

En 2005, préalablement à l'engagement de la phase expérimentale, les données du réseau de mesures OPERA de l'IRSN ont été exploitées (mesure d'air et d'eau de pluie) en vue d'étudier la variabilité du rapport de lessivage atmosphérique (Bois 2005). Ce rapport défini comme le rapport d'activité entre l'eau de pluie et l'air ($\text{Bq.l}^{-1}/\text{Bq.m}^{-3}$) a pu être étudié pour certains radionucléides naturels, comme le ^7Be , le ^{210}Pb et le ^{40}K ou artificiel tel que le ^{137}Cs . Cette analyse a eu pour objectif de rechercher les paramètres influant sur le rapport de lessivage, le rapport de lessivage étant alors considéré comme un des indicateurs de la sensibilité d'un territoire vis-à-vis des pluies. Si le rapport de lessivage est important, le territoire recevra quantitativement plus du polluant que pour une faible valeur.

Les rapports de lessivage des radionucléides naturels, du ^7Be et du ^{210}Pb notamment, obtenus à partir des dispositifs de prélèvement d'air et d'eau de pluie du réseau OPERA sur des pas de temps calendaires sont en bon accord avec les valeurs fournies par la littérature. Les niveaux d'activité volumique élevés ont permis de travailler uniquement sur des valeurs significatives. La constance des valeurs du W_r est en relation avec le mode de production de ces radionucléides.

Pour le ^{137}Cs , dont le niveau d'activité volumique est actuellement très faible (de l'ordre du $\mu\text{Bq.m}^{-3}$), on a constaté une augmentation de l'amplitude de variation et des valeurs moyennes du rapport de lessivage. Cette augmentation coïncide avec la période (début des années 80) à partir de laquelle le compartiment atmosphérique n'est plus considéré comme le réservoir principal de la radioactivité artificielle, au profit du compartiment terrestre. Les phénomènes de remise en suspension et le niveau d'empoussièrement contribuent alors fortement au niveau d'activité dans l'air et induisent une plus grande variabilité des niveaux observés. Ainsi, plus le niveau d'activité ambiant est faible et plus le W_r varie. La variabilité observée pour le W_r est probablement plus liée à la variation des caractéristiques des aérosols remis en suspension qu'à la variabilité du phénomène de lessivage sensu stricto.

Cette étude, réalisée sur une base de temps mensuelle, de 1972 à 2004, a montré l'existence d'une variabilité importante des rapports de lessivage des radionucléides à partir de données mensuelles. Il en résulte vraisemblablement une variabilité encore supérieure si l'on venait à considérer les épisodes pluvieux les uns après les autres. Ce point est d'importance lorsqu'on souhaite évaluer le rabattement au sol des polluants pour une situation donnée et notamment lorsqu'on souhaite rendre compte avec exactitude des dépôts en situation de rejet accidentel. La variabilité du rapport de lessivage atmosphérique des radionucléides, naturels ou artificiels, semble influencée par des éléments très divers tels que le type de précipitation, les saisons, la taille des aérosols, la durée et l'intervalle de temps entre deux précipitations, le phénomène de remise en suspension et l'origine de masses d'air.

Ce travail qui constitue le constat préliminaire de l'importance de la variabilité des valeurs du W_r doit être suivi de l'étude des facteurs à l'origine de cette variabilité (identification, caractérisation et contribution relative).

3.1.4 PREVISIONS POUR 2006-2008

L'étude de la sensibilité des territoires aux dépôts doit permettre de définir une typologie des précipitations auxquelles seront associées des valeurs de rapports de lessivage. La typologie s'appuiera sur des paramètres dont la caractérisation permet de traduire la qualité de la masse d'air avant ou après la pluie et donc d'en déduire par différence le flux de dépôt, à savoir :

- le type de précipitations (averse, ondée, neige, bruines, brouillard),
- l'intensité de la pluie en distinguant les différentes phases des hyétoigrammes¹,
- la durée de la précipitation,
- l'origine des masses d'air (océanique, continentale, méditerranéenne),
- la localisation géographique des évènements climatiques,
- la taille des particules et des gouttes,
- l'intervalle de temps entre les précipitations qui conditionne la recharge de l'atmosphère en particules et en polluants,
- la concentration en aérosols,
- le taux de remise en suspension.

Les valeurs du rapport de lessivage seront étudiées en fonction des différents paramètres listés et une synthèse sera fournie en fonction de la typologie des pluies retenue. L'étude passe par un état bibliographique complet des types de pluies rencontrés sur le territoire français.

4 LA SENSIBILITE DES SOLS

Le sol est un compartiment central de l'environnement de par ses propriétés de collecte, de stockage et de redistribution des radionucléides. Ces particularités en font un compartiment beaucoup plus complexe que les autres à étudier du point de vue de la sensibilité radioécologique car la sensibilité du sol peut venir de chacune de ces propriétés prises isolément (indicateurs de sensibilité multiples) et chacune d'elles est déterminée par des facteurs de sensibilité différents.

¹ Evolution de l'intensité de la pluie exprimée en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ au cours d'un évènement pluvieux.

- Si l'on considère le sol comme support de culture, un sol sera perçu comme sensible du fait de sa capacité à amplifier les transferts de polluants vers les plantes et le projet SENSIB s'intéresse alors aux caractéristiques de l'environnement, par exemple les valeurs de pH (facteur de sensibilité), qui vont déterminer de fortes valeurs du facteur de transfert sol/plante (indicateur de sensibilité).
- Si l'on considère le sol comme zone de stockage, un sol est sensible si les polluants ont tendance à s'y accumuler et c'est alors les caractéristiques de l'environnement (facteurs de sensibilité) qui influencent le Kd (coefficient de partition entre la phase liquide et la phase solide) et conduisent à des stocks importants (indicateurs de sensibilité) qu'il faut étudier. Pour le projet SENSIB, la priorité a été donnée à la recherche des territoires sensibles d'un point de vue de l'impact pour les populations. Le sol étant rarement une source d'exposition directe à la radioactivité importante pour la population, il n'est pas prévu d'étudier les facteurs de sensibilité spécifiques du stockage dans cette étape du projet SENSIB². De plus la compréhension des mécanismes conduisant à une accumulation importante de radioactivité dans l'environnement relève des problématiques du projet EXTREME (Eyrolle 2005) et est donc étudiée par ailleurs au sein de l'Institut.
- Si l'on considère le sol comme barrière vis-à-vis de la contamination des nappes, un sol sera perçu comme sensible si les polluants y sont très mobiles et le projet SENSIB s'intéresse alors plutôt aux caractéristiques hydrodynamiques du sol (facteurs de sensibilité) qui déterminent les fortes valeurs de flux (indicateur de sensibilité).
- Si l'on considère le sol comme zone de redistribution avant le cours d'eau exutoire du bassin versant, c'est l'aléa érosif des sols qui est à considérer et la pente, la pluviométrie, le couvert végétal et le type de sol (facteurs de sensibilité) vont déterminer les flux à l'exutoire (indicateur de sensibilité).

Le devenir des radionucléides dans les sols, à travers la mobilité des stocks de radioéléments ainsi que l'évolution de leur biodisponibilité, déterminent l'intensité de l'exposition de l'homme et de l'environnement à long terme. Les paramètres qui influent sur ce devenir sont donc des facteurs importants de sensibilité de l'environnement aux apports passés et futurs de radionucléides et tiennent donc une place importante dans le projet SENSIB.

Aujourd'hui, la représentation des transferts de radionucléides dans les sols pour l'évaluation des risques pour l'homme et pour l'environnement repose sur l'utilisation de macro-paramètres - le facteur de transfert sol-plante, le coefficient de partage entre l'eau et le sol, la constante de disparition d'un radionucléide du sol, ... - qui regroupent les différents processus de mobilité et de biodisponibilité des radionucléides et combinent donc de nombreuses sources de variabilité. Les objectifs du projet SENSIB appliqué au compartiment « Sol » sont d'identifier les facteurs de sensibilité de ces macro-paramètres, de renseigner

² Cette voie d'exposition peut cependant être une voie d'exposition principale pour d'autres polluants que les radioéléments (cas des sols pollués par les métaux).

leur gamme de valeur à l'échelle de la France, de caractériser leur influence sur les macro-paramètres et de les hiérarchiser par rapport à cette influence. Ces facteurs de sensibilité peuvent être des caractéristiques intrinsèques du sol (pH, taux de matières organiques, taux d'argile, capacité d'échange cationique, ...) ou des caractéristiques du territoire concerné (pluviométrie, pente, ...).

Différentes études sont proposées ci-après pour acquérir, à partir de zones ateliers, les données permettant de remplir les objectifs du projet SENSIB appliqué au compartiment sol.

4.1 LA SENSIBILITE DES SOLS A LA MIGRATION VERTICALE

4.1.1 OBJECTIFS

Dans le contexte post-accidentel, l'enjeu majeur du projet SENSIB est de pouvoir déterminer la sensibilité des productions agricoles à court terme, mais il est aussi important lorsque l'accident a des conséquences observables à plus long terme de pouvoir expliquer quels sont les territoires qui sont sensibles à cette autre échelle de temps. Dans cette perspective, les stocks d'activités exportées par les productions agricoles (Chapitre 6 du présent rapport sur la sensibilité des productions agricoles) ne sont plus les seuls indicateurs de sensibilité pertinents car il faut principalement pouvoir déterminer des indicateurs dynamiques comme le temps de résidence et la vitesse de migration et pouvoir les corrélérer au facteur de transfert du sol vers les plantes (prairies, champignons).

4.1.2 METHODOLOGIE

Le travail entrepris sur les zones ateliers du Mercantour, du Jura et des Vosges doit permettre de proposer des explications sur les mécanismes d'accumulation dans les sols et d'identifier les différents facteurs de sensibilité prépondérants. Il s'agira ensuite de faire le lien entre les résultats de ces études sur les sols et la fraction d'activité biodisponible pour les végétaux présents dans ces milieux. La difficulté majeure rencontrée dans l'établissement de ces relations tient dans l'extrême variabilité rencontrée quelle que soit l'échelle d'observation des activités environnementales que ce soit dans les sols ou dans les productions végétales. La migration des radioéléments artificiels (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$) dans les sols est étudiée au travers de leur répartition verticale, de la variabilité des rapports d'activité entre les isotopes mesurables et du calcul des vitesses de migration. Ce travail repose sur la détermination de ces paramètres dans différents sols (Vosges, Jura, Mercantour, ...) contaminés à des niveaux comparables, mais qui présentent des compositions minéralogiques, chimiques, des taux de saturation et des types de couverture végétale très variables.

4.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

Les mesures réalisées ont montré que la migration verticale de l'ensemble des radioéléments étudiés est plus importante dans les sols du Jura en comparaison des observations faites pour les sols forestiers ou saturés des Vosges et de la tourbière du Mercantour (Solovitch-Vella et Pourcelot 2005). De manière générale, la vitesse de migration de tous les radioéléments est

inférieure à 1 cm.an^{-1} dans les horizons superficiels (0-20 cm) et elle peut atteindre 2 à 3 cm.an^{-1} dans les horizons plus profonds. Parmi les quatre radioéléments étudiés, le ^{90}Sr est l'élément le plus mobile. La mobilité importante du ^{90}Sr peut induire sa migration vers les horizons plus profonds mais également le recyclage par les arbres d'une part importante du stock déposé. Cette hypothèse reste à vérifier en élaborant un échantillonnage qui permette de caractériser les activités de ^{137}Cs et ^{90}Sr dans les différents compartiments des arbres.

L'originalité de ce travail réside dans l'utilisation de différents rapports isotopiques qui permettent de calculer et de comparer les vitesses de migration des radioéléments dans les horizons des sols. La variation des rapports d'activité des radioéléments en fonction de la profondeur et le calcul de vitesses de migration a permis de mettre en évidence, entre autres, une migration différente du $^{239+240}\text{Pu}$ et de l' ^{241}Am dans les sols. De plus, il a été montré que les différences de transfert du $^{239+240}\text{Pu}$ et de l' ^{241}Am sont déterminées par la nature du sol. Ainsi, la migration de ^{241}Am est moins importante que celle de $^{239+240}\text{Pu}$ dans le sol de la tourbière alors qu'elle est plus importante dans les sols des Vosges.

Pour prédire les mécanismes sous-jacents à la mobilité des radioéléments dans les sols, cette étude suggère un travail supplémentaire de modélisation géochimique. Cette approche pourrait permettre de tenir compte de la spéciation des radioéléments dans les sols, d'identifier les phases porteuses des radioéléments et de tester la sensibilité des paramètres influant sur la mobilité des radioéléments aux changements des conditions physico-chimiques.

4.1.4 PREVISIONS POUR 2006

En 2006, il est envisagé d'étendre le travail sur la migration verticale en étudiant la migration dite « verticale ascendante » c'est-à-dire le transfert de la fraction d'activité biodisponible du sol vers les végétaux et notamment vers l'herbe de prairie. Certains environnements terrestres présentent en effet une forte rémanence des dépôts consécutifs aux retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, en raison de pratiques agricoles faibles ou inexistantes, comme c'est le cas des zones de prairies permanentes. Les activités des produits de fission mesurées dans les fromages, le lait et l'herbe des prairies permanentes (^{137}Cs et ^{90}Sr) constituent alors des indicateurs de la contamination de ces zones.

Les sols des prairies permanentes sont caractérisés par des activités très variables et des transferts aux herbacées également variables, quelles que soient les échelles d'observation. Ainsi, une part de la variabilité observée dans l'herbe et dans une moindre mesure dans les produits laitiers est propagée à partir de la diversité de la nature des sols. D'autre part, dans certaines zones, des activités anormalement élevées, au regard des connaissances actuelles des facteurs de transfert, sont mesurées dans l'herbe, le lait et les produits laitiers. Pour ces raisons, la réponse des indicateurs (activités de l'herbe, du lait et des fromages) est entachée d'une forte variabilité qui peut s'étendre sur 3 ordres de grandeur, ce qui rend limitée l'interprétation de ces données en contexte post accidentel.

L'étude proposée sous la forme d'une thèse vise à acquérir de l'information pour améliorer les stratégies d'échantillonnage et de traitement de l'information obtenue à partir des études

de terrain. Il s'agit principalement d'étudier la variabilité spatiale des caractéristiques territoriales qui déterminent la sensibilité radioécologique. Différentes échelles d'observation permettront de mieux appréhender le format d'information que l'on peut obtenir en fonction du niveau spatial de collecte de cette information. Le sujet est ciblé à la fois sur la diversité des sols et les transferts de ^{90}Sr et ^{137}Cs aux interfaces sol/herbe et herbe/lait, puis lors de l'élaboration des fromages (lait/fromages). Il s'agit de mieux cerner la réponse des indicateurs dans des contextes d'hétérogénéité des sols et de facteurs de transfert très variables, en relation avec les variabilités écologiques et les différentes pratiques des filières fromagères AOC.

4.2 LA SENSIBILITE DES SOLS A LA MIGRATION HORIZONTALE

Deux approches sont proposées pour étudier la migration horizontale des radionucléides. La sensibilité d'un bassin versant à l'entraînement des radionucléides peut être évaluée par un bilan établi en sortie du système, c'est à dire par des mesures de flux à l'exutoire, au niveau du cours d'eau : c'est l'approche par comparaison de bassins versants. Cette approche est complémentaire de l'étude de la mobilité des radionucléides au niveau des sols eux-mêmes sur un site atelier : le bassin versant de La Peyne.

4.2.1 COMPARAISON DE BASSINS VERSANTS

4.2.1.1 OBJECTIFS

L'étude en cours a pour objectif de « caler » un modèle opérationnel décrivant le drainage des radionucléides par un cours d'eau, à partir de l'utilisation de séries de résultats de mesures environnementales. Pour le projet SENSIB, les résultats de cette étude seront exploités afin d'identifier les facteurs de sensibilité qui déterminent l'ampleur des processus de drainage et afin de caractériser la variabilité de ces processus à l'échelle du territoire français.

4.2.1.2 METHODOLOGIE

Un modèle opérationnel décrivant le drainage des radionucléides a été sélectionné à partir d'une synthèse bibliographique. Ce modèle fournit une expression du flux dissous dans les cours d'eau en fonction du débit de la rivière et de l'activité déposée sur le bassin versant. Afin de caler ce modèle pour le ^{137}Cs issu de l'accident de Tchernobyl et les principaux cours d'eau français, des séries de données rendant compte de l'évolution temporelle de l'activité du ^{137}Cs dans l'eau sont nécessaires. La difficulté inhérente à la mesure de ce radionucléide dans l'eau a conduit à appréhender son activité au travers de celle, plus aisément mesurable, des sédiments et des plantes aquatiques. Des mesures sur ces indicateurs, en amont de tout rejet d'effluents industriels, ont notamment été réalisées depuis 1991 dans le cadre du suivi annuel des centrales électronucléaires françaises. Le modèle de drainage est donc calé essentiellement sur ces données à un facteur multiplicatif près (ce facteur étant un coefficient de partage eau/matière solide, KD, ou un facteur de concentration). Ceci

nécessite cependant quelques adaptations préalables : le KD étant dépendant des caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiments, une standardisation de leur activité sur des critères granulométriques doit être effectuée. Pour les végétaux aquatiques, il est nécessaire de rechercher leur temps de réponse avant de pouvoir caler le modèle.

4.2.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

Les résultats obtenus, sur les plantes comme sur les sédiments, indiquent que pour les grands cours d'eau français, l'activité du ^{137}Cs en milieu aquatique diminue depuis 1987 avec une période effective de 4 à 7 ans (Vray *et al.* 2005). Si le niveau de contamination de chaque cours d'eau dépend de la contamination moyenne du bassin versant (dépôt moyen en Bq.m^{-2}), il semble que ce niveau soit également influencé par d'autres paramètres comme la taille du bassin versant, voire certaines caractéristiques des sols drainés.

4.2.1.4 PREVISIONS POUR 2006

La connaissance de l'influence de la taille du bassin sera approfondie en 2006 en élargissant le nombre de sites d'étude à différents lacs du Mercantour (14 lacs situés environ à la même altitude mais dont les surfaces drainées sont de tailles différentes).

4.2.2 ETUDE IN SITU DU BASSIN VERSANT DE LA PEYNE

4.2.2.1 OBJECTIF

Ce travail a pour objectif d'identifier les facteurs de sensibilité des sols au processus de migration horizontale, érosif principalement. Une méthode d'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion du type de celle que l'on veut obtenir dans le cadre du projet SENSIB a été développée par l'INRA (INRA 1998). Elle est basée sur les quatre facteurs de sensibilité suivants : pente, couvert végétal, type de précipitation et type de sol (érodibilité, battance). Pour le projet SENSIB, il s'agit donc essentiellement d'étudier l'adaptation de cette méthode aux cas des radionucléides. Est-ce que les facteurs de sensibilité proposés sont pertinents dans le cas de la radioactivité ? Est-ce que l'indexation proposée pour le modèle hiérarchique de l'INRA est pertinente par rapport aux problématiques radioécologiques ?

4.2.2.2 METHODOLOGIE

La démarche suivie consiste, dans un premier temps, à évaluer l'influence relative des phénomènes de ruissellement et d'érosion sur l'entraînement de différents radionucléides mesurables dans l'environnement, à savoir ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am et ^{90}Sr , dont les propriétés chimiques pourraient conduire à des comportements différents. Le ruissellement est pris en considération en tant que vecteur de transport des radionucléides sous forme dissoute, alors que l'érosion (essentiellement sous forme d'érosion hydrique) est responsable du transport des radionucléides associés aux particules solides du sol. Dans un second temps, il sera nécessaire d'identifier et d'évaluer les différents facteurs responsables de ces deux phénomènes, et en particulier de l'érosion. Ces deux étapes sont traitées de façon théorique

en s'appuyant sur les connaissances existantes en matière de radioécologie et d'érosion des sols. Cette partie théorique doit permettre de lister les critères nécessaires à prendre en compte pour la classification et éventuellement la cartographie des zones « sensibles » en termes de migration horizontale des radionucléides. Parallèlement, l'étude d'une zone atelier, le bassin versant de la Peyne, doit permettre de constater l'effet résultant de ce transport horizontal, et éventuellement de vérifier l'importance des différents critères identifiés précédemment.

4.2.2.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

En 2005, la synthèse bibliographique réalisée a permis de proposer une méthode de localisation des zones susceptibles d'être les plus sensibles à ce phénomène d'entraînement en croisant les différents facteurs de sensibilité identifiés : pluviométrie, pente, couvert végétal et nature du sol (Duffa et Danic en cours). Cette approche a déjà été utilisée, notamment par l'INRA, dans le cadre d'études visant à établir des cartes d'érodibilité des sols et semble satisfaisante. Afin de travailler sur un cas concret et de compléter l'approche prédictive basée sur la méthodologie de l'INRA par une approche descriptive s'appuyant sur des mesures in situ, l'étude d'un bassin versant celui de la Peyne, sous-bassin de l'Hérault, est en cours (Duffa et Danic en cours). Le choix de la zone d'étude a été conditionné par différents critères :

- choix d'un bassin versant de type méditerranéen, car de par leurs caractéristiques (pentes raides, sols peu profonds et pauvres en matière organique, soumis à des climats de forte variabilité), ils sont a priori plus sensibles au risque d'érosion,
- superficie suffisante pour être caractérisée par les informations cartographiques disponibles sous SIG et pour présenter une diversité suffisante en termes de sensibilité des sols,
- et taille du bassin versant d'une superficie raisonnable pour permettre son étude sur le terrain.

4.2.2.4 PREVISIONS POUR 2006

En 2006, la méthode de localisation des zones susceptibles d'être les plus sensibles sera appliquée au cas du bassin versant de la Peyne par le croisement spatial des données concernant les facteurs de sensibilité à l'aide d'un SIG (Système d'Information Géographique). Il s'agit d'identifier des zones théoriquement différentes en termes de comportement vis-à-vis de l'érosion sur la base des facteurs de sensibilité pente, couvert végétal, type de pluie et type de sol, de vérifier que ces différences théoriques sont observables sur le terrain en termes de stock de radionucléides sur la colonne de sol et d'en déduire une stratégie d'échantillonnage pour quantifier l'influence de chacun des facteurs de sensibilité ou par groupes en fonction des corrélations entre les facteurs de sensibilité.

5 LA SENSIBILITE DES BERGES DE RIVIERES

Les berges étant les secteurs fluviaux les plus mobiles en tant que compartiments de stockage et de déstockage de polluants, ce type de territoire a été choisi comme premier axe d'étude du volet fluvial du projet SENSIB. Cet axe d'étude fait l'objet d'une collaboration avec le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de L'Environnement - UMR 6635) car les berges du Rhône sont étudiées au CEREGE depuis plusieurs années.

5.1 OBJECTIF

L'objectif général est d'identifier les critères permettant d'établir une cartographie de la sensibilité des berges du Rhône suite à un rejet accidentel de radioactivité dans le fleuve. Il s'agit notamment de pouvoir identifier, en fonction de différentes valeurs du débit du Rhône, quelles sont les zones de stockage de la radioactivité ?

La zone d'étude envisagée est l'ensemble des berges du Rhône en aval du site nucléaire de Tricastin jusqu'à Arles. Dans un premier temps, le travail pourra démarrer à partir du suivi de zones ateliers représentées par des types de berges différents. La généralisation des résultats acquis sur les zones ateliers au cas de l'ensemble du Rhône de Tricastin à Arles sera ensuite étudiée.

5.2 METHODOLOGIE

La connaissance de la sensibilité relative d'un territoire nécessite d'étudier les facteurs qui déterminent cette sensibilité et qui sont susceptibles de la modifier, c'est à dire d'augmenter ou de diminuer les conséquences d'une pollution. Parmi les paramètres écologiques fluviaux, la présente étude porte sur les paramètres géomorphologiques des berges qui amplifient ou réduisent l'accumulation de sédiments, donc de vecteurs potentiels de polluants, comme par exemple : la pente, la lithologie, la cohésion des sédiments, le type de ripisylve³, la densité des aménagements humains ...

L'étude implique un inventaire des travaux universitaires sur le sujet, notamment ceux disponibles au CEREGE. Il s'agit d'en extraire les données utilisables pour le projet SENSIB, afin d'identifier et de caractériser les facteurs de sensibilité des berges.

En parallèle, la mise en place (choix raisonné et argumenté) de zones ateliers ainsi que leur suivi au cours des différentes périodes de fonctionnement du Rhône (étiage, débit nominal, crue) doit permettre de consolider les enseignements de l'approche bibliographique. Par suivi, on entend la réalisation des points suivants :

- caractérisation de l'état de référence des berges choisies : relevé topographique, réalisation de carottes, analyses granulométriques des différents niveaux identifiés par les carottes, analyse de la cohésion des sédiments au moyen de pénétromètre,

³ Végétation des berges.

caractérisation de la ripisylve et des aménagements humains par photo-interprétation et relevé de terrain,

- mise en place de chaînes d'érosion⁴ pour suivre l'évolution physique de la berge en termes d'accumulation ou d'érosion,
- après chaque crue ou à défaut, à la fin de la période d'étude : relevé topographique, relevé de l'état des chaînes d'érosion, analyses granulométriques des éventuels dépôts.

Les modalités de ce suivi pourront être ajustées en fonction des enseignements de l'approche bibliographique.

5.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

Un premier travail réalisé en 2005 a permis de faire le point sur l'évolution contemporaine du linéaire de berges entre Arles et Beaucaire et notamment de mettre en évidence l'ampleur des réajustements verticaux et latéraux du Rhône (Villiet 2005). Les principales causes de ces évolutions ont été recherchées.

Une campagne de prélèvements et d'analyses granulométriques a aussi été réalisée sur ce tronçon et une classification typologique des berges a été proposée dans le cadre de ce travail. Ces deux derniers éléments doivent servir à la définition d'ensembles de berges homogènes afin de choisir l'implantation des zones ateliers.

5.4 PREVISIONS POUR 2006

En 2006, il est prévu de choisir les lieux d'implantation des zones ateliers des berges du Rhône et de réaliser leur suivi tel que présenté dans le paragraphe méthodologique.

6 LA SENSIBILITE DES PRODUCTIONS AGRICOLES

6.1 CAS DE LA SENSIBILITE DES PRODUCTIONS CEREALIERES A UN REJET ACCIDENTEL : EXEMPLE DU BLE D'HIVER

6.1.1 OBJECTIF

Le but de ce volet d'études est d'évaluer la sensibilité des productions agricoles vis-à-vis d'un rejet accidentel de radioactivité. Il s'agit de savoir si un dépôt uniforme et ponctuel entraînerait une contamination identique d'une production à l'échelle du territoire national.

6.1.2 METHODOLOGIE

Les études réalisées dans le cadre du projet SENSIB s'appuient sur les équations du modèle ASTRAL qui permet d'évaluer le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire

⁴ Instrument de terrain permettant de quantifier l'érosion ou le dépôt sur les berges des rivières.

terrestre suite à une émission atmosphérique accidentelle (Renaud *et al.* 1999) (Mourlon et Calmon 2002). On recherche les paramètres du modèle qui sont régionalisables et on étudie la sensibilité du modèle à la variabilité régionale. Le paramètre d'ASTRAL sur lequel l'étude se concentre est le facteur de transfert de la radioactivité de l'air à la production. Ce facteur dépend à la fois des paramètres de captation et de translocation, puisque la récolte est contaminée quand les radionucléides déposés sur les feuilles sont assimilés et transportés vers les parties consommées. La méthodologie consiste donc à régionaliser ces paramètres. Pour cela, le logiciel STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour des Cultures Standards) développé par l'INRA d'Avignon a été utilisé (Brisson 2003). Ce modèle propose un suivi au pas de temps journalier de l'indice foliaire, ainsi que les dates d'occurrence des stades agronomiques de différentes productions agricoles. Ces variables peuvent être corrélées à la captation et à la translocation. Les sorties des simulations effectuées sur différentes stations climatiques et éventuellement pour différentes variétés permettent alors d'exprimer les paramètres de captation et de translocation selon la typologie d'ASTRAL, c'est-à-dire en fonction du délai dépôt-récolte. Ces valeurs peuvent ensuite être confrontées à des données bibliographiques et aux travaux menés par l'IRSN dans le cadre de programmes expérimentaux.

6.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

L'étude réalisée sur le blé d'hiver a permis de montrer l'intérêt de la régionalisation dans l'estimation de la contamination des produits végétaux en cas d'accident (Delboe et Mercat-Rommens 2005). Il existe, en effet, des dates de dépôt pour lesquelles des régions peuvent échapper totalement à la contamination, alors que d'autres seront contaminées au maximum. Ces régions peuvent être identifiées par le suivi dans le temps de quelques paramètres agronomiques : la date de floraison ou la connaissance du couple variété/climat qui permet alors d'estimer la date de floraison.

6.1.4 PREVISIONS POUR 2006

La problématique de l'étude régionalisée de la contamination accidentelle d'une production agricole sera étendue au cas des principales céréales françaises, ainsi qu'à la prairie comme préalable à l'étude de la filière laitière. Une collaboration avec l'Institut du végétal Arvalis est en cours afin d'obtenir une cartographie de la sensibilité des cultures céréalières françaises en fonction de la date d'occurrence du rejet.

6.2 CAS DE LA SENSIBILITE DES LEGUMES A UN REJET CHRONIQUE

6.2.1 OBJECTIF

L'objectif général de l'étude est d'essayer de fournir des valeurs régionalisées de certains paramètres de l'équation de transfert atmosphérique des radionucléides aux végétaux à partir de l'analyse statistique de séries de mesures issues des rapports trimestriels produits par le Département de Protection Sanitaire entre avril 1961 et décembre 1979.

6.2.2 METHODOLOGIE

Pour modéliser la contamination des végétaux, il faut prendre en compte les deux voies de transfert des radionucléides (foliaire et racinaire). Le modèle utilisé calcule la contamination d'un végétal (en Bq.kg^{-1}) à une date donnée. Le pas de temps de l'étude est le mois. Le dépôt est considéré comme constant durant cet intervalle. Tous les calculs sont effectués en considérant le végétal à maturité (prêt à être consommé).

L'équation de la contamination des végétaux fait notamment intervenir trois paramètres que l'on cherche à régionaliser :

- le rapport de captation (sans dimension),
- le facteur de transfert racinaire ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$ frais),
- et la constante de décroissance totale du radionucléide biodisponible dans le sol (jours^{-1}).

Ces trois paramètres vont être estimés à l'aide des différentes séries de données en vue d'obtenir des valeurs régionales pour chaque couple (légume, radionucléide).

6.2.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

En 2005, le rapport de captation a été étudié seul à l'aide des séries de données sur les radionucléides à vie courte (Briand 2005). En effet, dans le cas d'un apport de radionucléide à vie courte par voie atmosphérique, la contamination d'un végétal se fait uniquement par voie foliaire (le transfert par le sol peut être négligé, les radionucléides de période courte ne s'accumulant pas dans le sol). Ainsi, l'équation de la contamination des végétaux se restreint à la partie transfert foliaire. Des tests statistiques sur les différentes estimations obtenues ont été réalisés mais la significativité statistique des résultats obtenus n'est pas bonne.

Le traitement de ces données met ainsi en évidence les limites de la complémentarité entre le modèle et les données disponibles pour l'estimation de ces trois paramètres :

- le dépôt n'est pas constant sur le pas de temps de l'étude : même sur le mois, le dépôt est variable, il faudrait donc améliorer le modèle en supposant une activité constante sur la semaine, mais les données ne sont pas disponibles à cette échelle de temps ;
- les dates de prélèvement mentionnées : les résultats fournis ont été affectés au 28 de chaque mois, ce qui pourrait en partie expliquer les écarts constatés entre valeurs prédites et observées ;
- certaines valeurs mesurées sont très élevées : il est possible que les végétaux aient été mal lavés (présence de terre), les radionucléides présents dans la terre influençant alors fortement la concentration finale ;
- la concentration dans les végétaux n'est pas forcément mesurée lorsqu'ils sont à maturité.

6.2.4 PREVISIONS POUR 2006

En 2006, un bilan complet de l'étude de l'ensemble des résultats de mesures environnementaux de la série de données sera réalisé.

De plus, un volet complémentaire de cette étude va commencer début 2006. Il s'oriente vers l'utilisation des techniques de Monte Carlo pour réaliser l'analyse de sensibilité de l'équation du transfert de radionucléides vers les végétaux, et sur le développement d'un post-traitement original permettant de déterminer les combinaisons de valeurs des paramètres d'entrée qui conduisent à obtenir des concentrations en sortie du modèle dans certaines gammes de valeurs prédéterminées.

7 LA SENSIBILITE ANTHROPIQUE DES TERRITOIRES

7.1 OBJECTIF

L'objectif de l'étude est d'améliorer la connaissance des comportements alimentaires des populations à proximité du site nucléaire de Pierrelatte-Tricastin : rations journalières et autoconsommation. Dans le cadre du projet SENSIB, cette étude sera mise en perspective de l'étude similaire réalisée autour du site nucléaire de Marcoule en 1998 (Descamps et Guillet 2004), ainsi que de l'ensemble de la bibliographie disponible concernant les comportements alimentaires des groupes de référence autour des sites nucléaires français afin d'apporter des éléments pour évaluer la contribution de la composante anthropique de la sensibilité radioécologique.

7.2 METHODOLOGIE

Une enquête alimentaire est réalisée dans les villages et petites villes à proximité du site de Pierrelatte, afin de déterminer les rations journalières et d'étudier les pratiques d'autoconsommation. Dans un premier temps, les populations cibles ont été identifiées, et un échantillon de foyers a été constitué. Les habitudes alimentaires sont étudiées de façon prioritaire chez des familles vivant en milieu rural, dans la zone sous le vent du site nucléaire, et possédant un jardin potager ou un verger. Dans un deuxième temps, l'autoconsommation des citadins est étudiée. L'enquête alimentaire est réalisée par la méthode des carnets de consommation sur sept jours, et au moins sur quatre périodes afin de prendre en compte les variations saisonnières. Les menus des repas, l'origine des aliments, les quantités cuisinées, ainsi que le nombre de convives sont répertoriés pour les repas du midi et du soir. Les menus des enfants en bas âge sont enregistrés séparément. Les habitudes alimentaires relatives aux petits-déjeuners et en-cas sont indiquées de façon plus générale. Les données recueillies sont traitées afin de proposer des consommations alimentaires moyennes par classes d'âge et d'identifier la part des aliments autoconsommée.

7.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

Les foyers bollénois qui ont fait l'objet de l'enquête ont été déterminés, en collaboration avec les élus locaux, à partir d'un critère déterminant, à savoir celui de posséder un jardin (potager ou verger) ou d'être consommateurs réguliers de denrées alimentaires produites localement.

Les questionnaires ont été remis à différentes périodes de l'année pour pouvoir prendre en compte les effets de la saisonnalité :

- été 2004 : 75 questionnaires
- automne 2004 : 25 questionnaires
- hiver 2005 : 25 questionnaires
- printemps 2005 : 25 questionnaires.

Les questionnaires complétés constituent donc l'échantillon qui servira de base à l'analyse qui sera menée en 2006.

7.4 PREVISION POUR 2006

En 2006, les données acquises autour de Pierrelatte seront exploitées afin de décrire les habitudes alimentaires des habitants de la région de Pierrelatte-Tricastin. En particulier, cette analyse sera orientée vers l'amélioration de la connaissance en termes de pratiques d'autoconsommation, avec une comparaison des habitudes en milieu rural et citadin et une prise en compte de l'effet de la saisonnalité. La méthode employée, proche de celle utilisée pour l'enquête alimentaire menée en 1998 autour du site de Marcoule, devrait également permettre une comparaison des résultats inter-sites.

8 ETUDE COMPARATIVE DE LA SENSIBILITE GLOBALE DE DEUX SITES : MARCOULE VS LA HAGUE

8.1.1 OBJECTIF

Le principe de cette étude comparative est d'illustrer et de quantifier de potentielles différences de sensibilité grâce à des exemples concrets à partir de la comparaison de la sensibilité du site de La Hague et du site de Marcoule à un rejet chronique atmosphérique de radionucléide. Le choix des sites a été motivé par les fortes différences qu'ils présentent en termes de situation géographique, climatologie et productions agricoles, alors que ce sont deux centres de retraitement de combustibles usés dont la source de pollution est supposée globalement de même nature. Pour le premier volet de l'étude, la comparaison a porté sur la sensibilité des agro-systèmes.

8.1.2 METHODOLOGIE

La comparaison repose sur le calcul des activités en différents radionucléides (en 2005 : césium 137, cobalt 60, strontium 90 et iode 131) dans les produits animaux et végétaux

spécifiques aux deux sites, dans un rayon de 10 km autour des installations. Les activités dans le sol sont supposées dépendre uniquement des dépôts et l'activité initiale dans le sol est considérée comme nulle. Le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire se fait par voie foliaire uniquement, ce qui correspond à la première année d'un rejet chronique, pour laquelle on ne prend pas en compte le transfert par voie racinaire.

Les rejets étudiés sont des rejets chroniques atmosphériques, arbitrairement fixés à 10^{10} Bq.an⁻¹ de chacun des radionucléides. Le césium est un radioélément généralement considéré comme « mobile » dans les végétaux et les productions animales par comparaison avec d'autres radionucléides. Le cobalt 60 est considéré comme mobile dans les végétaux mais moins dans les produits animaux. Le strontium 90 est par contre peu mobile dans les végétaux. Il s'agit de vérifier si ces mobilités théoriques sont confirmées par nos estimations dans les différentes productions agricoles et quel est l'ordre de grandeur de l'activité globale en Becquerels que l'on retrouve dans les denrées produites dans la zone des 10 km autour de ces deux sites. Enfin, le cas particulier de l'iode 131 est étudié pour évaluer l'influence de la courte période radioactive sur la sensibilité des productions agricoles.

L'idée est donc d'évaluer l'influence de la variabilité régionale de chacune des caractéristiques de l'environnement agricole et l'influence combinée de l'ensemble de ces caractéristiques sur la différence potentielle de sensibilité entre les deux sites. Parmi les critères qui rendent compte de cette sensibilité du transfert des radionucléides depuis le dépôt au sol jusqu'aux productions agricoles animales et végétales, on a comparé :

- les activités totales (Bq) rejetées aux activités totales présentes dans l'ensemble des productions agricoles des zones considérées ;
- les activités massiques (Bq.kg⁻¹) des productions agricoles, entre elles et entre les deux sites.

8.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

L'effet des caractéristiques environnementales suivantes a été étudié : les conditions de diffusion atmosphérique et de dépôt, la topographie, le type de cultures végétales, le type de productions animales. Les différences de conditions météorologiques sont importantes entre les deux régions mais leur effet est finalement relativement faible sur l'activité totale déposée dans un rayon de 10 km entre les deux sites de Marcoule et de La Hague (Mercat et Vassas en cours). Ce point mériterait d'être confirmé/infirmé à l'échelle du territoire français en recensant l'ensemble des conditions météorologiques que l'on peut rencontrer autour des sites d'intérêt. L'effet des conditions météorologiques est par contre plus sensible lorsque l'on recherche l'existence de communes plus fortement exposées. La généralisation de l'étude des roses des vents à tous les sites nucléaires français est en cours afin de disposer d'éléments sur la gamme de variabilité des densités de dépôt, à l'échelle du territoire français.

Pour le césium 137 et le cobalt 60, l'environnement agricole du site de Marcoule apparaît globalement plus sensible que celui de La Hague, au sens où l'activité totale en Becquerels

exportée par les productions agricoles produites sur la zone des 10 km autour du site est plus importante à Marcoule qu'à La Hague. Pour le strontium 90 et pour l'iode 131, les deux environnements agricoles sont globalement équivalents.

Cette étude qui a privilégié la prise en compte des spécificités régionales montre que les facteurs de sensibilité clés sont respectivement le facteur de translocation et le rendement cultural pour les productions végétales et la ration et le facteur de transfert pour les productions animales.

La traduction de ces résultats de façon plus globale pour le projet SENSIB permet de proposer des voies d'identification des environnements agricoles les plus sensibles ou au contraire les moins sensibles et de quantifier les ordres de grandeur des différences d'activités résultantes dans ces environnements. Si l'on cherche l'environnement agricole le plus sensible en termes de productions présentant les activités massiques les plus importantes sur une zone de 10 km par contamination foliaire, il faudra combiner les facteurs de sensibilité suivants :

- l'intégralité de la zone dans un rayon de 10 km utilisée pour des cultures (absence de mer, forêt, zones urbaines, ...),
- la répartition des fréquences des vents aboutissant à une diffusion faible,
- les productions agricoles : prairies extensives non autoconsommées (ce qui est plutôt rare et ne peut correspondre qu'à une fauche de fin de saison qui ne serait pas consommée dans la zone des 10 km) ou légumes feuilles de faible rendement (mâche par exemple).

Si l'on s'intéresse à la sensibilité d'un point de vue de l'activité totale (Bq) « produite » indépendamment des niveaux maximums d'activité des produits, le critère de rendement n'est plus à considérer et les environnements les plus sensibles sont plus fréquemment rencontrés. Ils combinent alors les facteurs de sensibilité suivants :

- l'intégralité de la zone dans un rayon de 10 km utilisée pour des cultures,
- la répartition des fréquences des vents aboutissant à une diffusion faible,
- les productions agricoles : prairies cultivées pour la production de fourrages non autoconsommés ou tous types de productions de légumes feuilles.

On obtiendrait un facteur de l'ordre de 100 sur l'activité globale par rapport aux environnements agricoles les moins sensibles (diffusion atmosphérique forte, productions agricoles de fruits sous serre).

Ces enseignements restent cependant relativement spécifiques du scénario traité et de la modélisation utilisés (équation et valeurs pour les différents paramètres) et la généralisation de ces enseignements nécessiterait que l'on élargisse préalablement le travail en intégrant l'ensemble des gammes de valeurs que l'on peut trouver à l'échelle du territoire français pour les paramètres radioécologiques et agronomiques.

8.1.4 PREVISIONS POUR 2006

Certaines hypothèses simplificatrices ont été adoptées pour cette étude et constituent donc des perspectives pour élargir ce travail, par exemple par la prise en compte d'un rejet d'une durée supérieure à 1 an ou au contraire ponctuel, du transfert racinaire, des transferts de la mer vers la terre, d'une zone de diamètre supérieur à 10 km, d'autres radionucléides. Pour l'instant ces possibilités d'élargissement du travail n'ont pas encore été hiérarchisées.

9 INCERTITUDES, COMMUNICATION, PERCEPTION ET REPRESENTATION DES RESULTATS

9.1.1 OBJECTIF

Le travail réalisé depuis plusieurs années par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), en collaboration avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) et l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT - Université Paul Sabatier) sur la représentation et la propagation de l'information incomplète ou imprécise et son application dans le cas de la contamination de la chaîne alimentaire par un polluant a pour objectif principal de promouvoir la cohérence entre la manière dont l'information est mathématiquement représentée et l'information réellement disponible. Pour ce faire, des méthodes alternatives aux probabilités sont proposées pour représenter et propager les incertitudes.

9.1.2 METHODOLOGIE

De nombreux chercheurs ont utilisé soit les probabilités, soit les possibilités afin de représenter l'incertitude mais peu de chercheurs se sont intéressés à combiner ces deux types de représentations. Ce travail propose des méthodes pour combiner les différents modes de représentation de la connaissance. Dans un premier temps, une typologie liant les outils mathématiques de représentation de la connaissance (probabilités, p-boxes, possibilités, fonction de croyance) avec les types de connaissance disponibles concernant l'incertitude paramétrique (variabilité, information probabiliste incomplète, avis d'expert, connaissance de la valeur modale, connaissance de fractiles) est proposée. Une fois que la connaissance est représentée de façon cohérente par rapport à sa nature propre, épistémique ou stochastique, différentes méthodes de propagation des incertitudes à travers les modèles de risque ont été développées dans le cadre de cette étude et sont utilisables en fonction des structures de dépendance entre les paramètres. Les résultats issus de ces méthodes de propagation des incertitudes sont ensuite examinés pour en tirer les informations utiles pour une phase de décision et/ou pour orienter les programmes de recherche visant à acquérir de la connaissance supplémentaire. Ces méthodes alternatives ont été testées sur des cas réels et comparées à un traitement purement probabiliste afin de mettre en évidence l'influence de

la représentation mathématique de la connaissance et l'influence de la prise en compte des structures de dépendance sur les résultats du calcul de risque.

9.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2005

Ce travail a mis en évidence que l'utilisation systématique de distributions de probabilités pour représenter la connaissance environnementale est souvent subjective et arbitraire et peut conduire à sous-estimer le risque encouru par les populations. Pour dépasser ce problème, les possibilités de recours à différentes théories de l'incertain ont été étudiées (probabilités, possibilités, fonctions de croyance, p-boxes, variables aléatoires floues) (Baudrit 2005). Ce recours a nécessité des développements mathématiques et numériques pour élaborer des outils informatiques utilisables pour la représentation et la propagation des connaissances disponibles. Ces outils sont décrits notamment à travers leur application au cas de la contamination du lait suite à un dépôt chronique de strontium 90 (Mercat-Rommens *et al.* 2004) (Baudrit *et al.* 2005). Cet exemple concret permet notamment de quantifier l'impact des théories de l'incertain utilisées pour représenter et propager les incertitudes sur le résultat en termes de risque et de discuter des difficultés d'utilisation des différents types de résultats produits dans le cadre de la prise de décision.

9.1.4 PREVISIONS POUR 2006

Une réflexion sur la généralisation de l'utilisation de ce type de méthode et sur les difficultés de communication des résultats doit être menée, notamment en intégrant les différentes problématiques du projet SENSIB : classification du territoire, hiérarchisation des actions en contexte post-accidentel, communication en temps de crise avec différentes catégories d'acteurs ...

10 CONCLUSION

L'année 2005 a été une année charnière pour le projet SENSIB puisque celui-ci est passé d'une étape de réflexion sur sa faisabilité et ses orientations à une étape de réalisation des différentes études proposées durant la phase précédente. Les premiers résultats commencent à être disponibles et, point fort de l'année 2005, un séminaire interne de la Direction de l'Environnement et de l'Intervention de l'IRSN a été organisé sur deux jours en novembre. La trentaine de participants a ainsi pu débattre autour des présentations qui ont été faites des études du projet SENSIB et ces discussions collectives devraient permettre d'orienter au mieux les efforts sur le projet SENSIB en 2006 (Roussel-Debet *et al.* 2005).

11 BILAN DES CONTRIBUTIONS AU PROJET SENSIB EN 2005

11.1 RAPPORTS IRSN ET DOCUMENTS INTERNES

11.1.1 RAPPORTS DIFFUSES

- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2005-01 : Etude de la dynamique de drainage du ^{137}Cs présent sur les bassins versants des cours d'eau français. F. Vray, C. Debayle et J.M. Métivier.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2005-14 : Influence de la représentation de la connaissance sur les résultats de calcul de risque. C. Baudrit, C. Mercat-Rommens et E. Chojnacki.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2005-15 : Etude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur le blé d'hiver. A. Delboe et C. Mercat-Rommens.
- Rapport DRPH/SER 05-09 : Enquête alimentaire de Pierrelatte : étude des consommations alimentaires des populations à proximité du site Pierrelatte-Tricastin : rations journalières et autoconsommation. A. Pellet et C. Ringard.

11.1.2 RAPPORTS EN COURS DE PROCEDURE AQ

- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2006-16 : Devenir des radioéléments artificiels dans les sols. N. Solovitch-Vella et L. Pourcelot.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2005-34 : Sensibilité comparée de deux sites nucléaires : cas des productions agricoles contaminées par voie foliaire. C. Mercat et C. Vassas.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2006-11 : Entrainement et redistribution des radionucléides sur le bassin versant de la Peyne - rapport préliminaire. C. Duffa et F. Danic.

11.1.3 AUTRES DOCUMENTS PRODUITS EN 2005

- Fiche projet SENSIB v2.
- Compte rendu du 18/11/2005 du comité de suivi de la thèse de B. Briand. Chrono LERCM n° 2005-117.
- S. Roussel-Debet, K. Beaugelin et C. Mercat-Rommens, 2005. Document de restitution du séminaire interne de la DEI autour du projet SENSIB. Chrono LERCM n° 2005-121.
- E. Bois, 2005. Rapport de stage : Variabilité du rapport de lessivage atmosphérique des radionucléides. IUT de l'Université de Provence, Juin 2005.
- J. Villiet, 2005. Rapport de stage : Evolution topographique des berges du Rhône entre Arles et Beaucaire. Mémoire de Master de l'Université de Provence Aix-Marseille, 2005.

- C. Baudrit, 2005. Manuscrit de thèse, thèse soutenue le 19 octobre 2005. Représentation et propagation de connaissances imprécises et incertaines : application à l'évaluation des risques liés aux sites et aux sols pollués. Université de Toulouse III.

11.2 PUBLICATIONS ECRITES

- F. Eyrolle, D. Louvat, L.M. Métivier and B. Rolland, 2005. Origins and levels of artificial radionuclides within the Rhône river waters (France) for the last forty years: Towards an evaluation of the radioecological sensitivity of river systems, Radioprotection. Vol.40 (4), pp.435-446.
- N. Solovitch-Vella, L. Pourcelot, V.T. Chen, P. Froidevaux, F. Gauthier-Lafaye, P. Stille, D. Aubert, P. Steinmann. Comparative migration behaviour of ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in mineral and organic soils of France, en cours de soumission à Journal of Environmental Radioactivity.
- C. Mercat, E. Chojnacki, C. Baudrit. Ce que les théories de l'incertain peuvent apporter aux sciences environnementales. Contribution à l'ouvrage collectif Incertitude et Environnement de la collection de la société d'Ecologie Humaine, Editions EDISUD. En cours de préparation.

11.3 CONGRES (POSTERS ET COMMUNICATIONS ORALES)

- N. Solovitch-Vella, L. Pourcelot, P. Froidevaux, F. Gauthier-Lafaye, P. Stille, D. Aubert. Comparative migration behaviour of ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in soils: examples of forest soil of Vosges and wetland of Mercantour areas (France), Geochimica et Cosmochimica Acta, abstract of the 15th Goldschmidt conference, Moscow, USA May 2005.
- O. Masson, L. Saey, P. Paulat, E. Bois. Etude événementielle du lessivage de l'atmosphère, SFRP 2005, Nantes, Juin 2005.
- C. Mercat et P. Renaud. Le concept de sensibilité radioécologique et son intérêt pour l'évaluation et la gestion des risques, SFRP 2005, Nantes, Juin 2005.
- B. Briand. Etude des facteurs naturels ou anthropiques susceptibles d'augmenter ou de réduire les conséquences d'un rejet radioactif dans un environnement agricole. Contribution aux journées des thèses de l'IRSN à Aussois, 19-21 septembre 2005.
- L. Pourcelot, P. Stille, N. Solovitch-Vella, F. Gauthier-Lafaye, D. Aubert. Comparative study of the repartition of $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{90}Sr , anthropogenic lead and their natural analogues in soils, the 6th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry, Prague, September 9-16 2005.
- C. Mercat et P. Renaud. From radioecological sensitivity to risk management : the SENSIB Project, Radioactivity in the Environment, Nice, Octobre 2005.
- C. Mercat, E. Chojnacki et C. Baudrit. Ce que les théories de l'incertain peuvent apporter aux sciences environnementales. 17^{èmes} journées scientifiques de la société d'écologie humaine, colloque international Incertitude et Environnement, Arles 23-25 novembre 2005.

11.4 AUTRES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- N. Brisson et al. An overview of the crop model STICS, 2003. *European Journal of Agronomy*. Vol. 18. pp 309-332.
- B. Descamps et F. Guillet, 2003. Enquête alimentaire dans trois secteurs de la basse vallée du Rhône : Codolet, Tresques, Camargue. *Consommation/autoconsommation. Radioprotection*. Vol. 38(3). pp 299-322.
- F. Eyrolle, S. Charmasson, O. Masson. *Projet EXTEME : rapport de lancement. Rapport IRSN/DEI/SESURE/LERCM 2005-07.*
- INRA, 1998. *Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France. Collection Etudes et Travaux n° 18. Institut Français de l'Environnement.*
- L.Y. Maystre, J. Pictet et J. Simos, 1994. *Méthodes multicritères ELECTRE. Collection Gérer l'environnement. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Lausanne, Suisse). 323 pages.*
- C. Mercat-Rommens et P. Renaud, 2003. *Rapport de lancement du projet Sensibilité radioécologique (SENSIB). Rapport IRSN/DEI/SESURE/LERCM 2003-02.*
- C. Mercat-Rommens et P. Renaud, 2004. *Projet SENSIB : bilan de l'utilisation opérationnelle du concept de sensibilité de l'environnement. Rapport IRSN/DEI/SESURE/LERCM 2004-12.*
- C. Mercat-Rommens, E. Chojnacki, P. Renaud et F. Vray, 2004. *Exemple simplifié proposé comme cas d'étude pour la thèse sur la représentation de la connaissance. Rapport IRSN/DEI/SESURE/LERCM 2004-02.*
- C. Murlon et P. Calmon, 2002. *ASTRAL : a code for assessing situations after a nuclear accident. 12th annual meeting of SETAC Europe, Vienne (Autriche), 12-16 mai 2002.*
- P. Renaud, J. Real, H. Maubert and S. Roussel-Debet, 1999. *Dynamic modelling of the cesium, strontium and ruthenium to grass and vegetables. Health Physics, Vol. 76(5), pp. 495-501.*