

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Projet SENSIB

Rapport d'avancement 2006

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION

Service d'Etude et 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 2006</h2> Laboratoire d'Etudes Radioécologiques Continentales et Marines Rapport DEI/SESURE n° 2007-02					
	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	B. DUFER	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	24/01/07	24/01/07	30/01/07	12/02/07	
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
0		C. MERCAT	Création	

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme
C. MERCAT (chef de projet)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
O. MASSON (dépôt)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
L. BOURCIER (dépôt)	Thésarde
L. POURCELOT (sol)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
F. EYROLLE (berges)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
G. MAILLET (berges)	Post-doctorant
C. DUFFA (érosion / PRIME / milieu marin)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
B. BRIAND (milieux agricoles / méthode CART)	Thésarde
F. VRAY (enquête alimentaire)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
V. DURAND (milieux agricoles / enquête alimentaire)	Stagiaire / Intérimaire
JM. METIVIER (géostatistique)	IRSN/DEI/SECRE/LME
S. ROUSSEL-DEBET (PRIME)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
E. CHOJNACKI (incertitudes)	IRSN/DPAM/SEMIC/LMPC
H. THEBAULT (milieu marin)	IRSN/DEI/SESURE/LERCM

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
F. ROLLINGER	IRSN/DSDRE/DOS
JL. PASQUIER	IRSN/DESTQ
MP BIGOT	IRSN/COM
F. SOULET	DESTQ/DISCT/CRIS
A. OUDIZ	IRSN/DSDRE/DOSC
JC. BARESCUT	IRSN/DSDRE
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
P. BOUISSET	DEI/SESURE/LESE
P. CUENDET	DEI/SESURE/LVRE
J. GUILLEVIC	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.

Pour l'année 2006, le déroulement du projet est globalement conforme au planning général de réalisation du projet SENSIB et aux perspectives annoncées en 2005. Des facteurs de sensibilité ont été identifiés dans divers milieux (études thématiques) et des méthodes et outils spécifiques du projet sont développés. 14 publications (revues & congrès) et 9 rapports IRSN ont été produits. Un groupe de travail international a été lancé à l'initiative de l'IRSN. Le site internet de SENSIB sur le site scientifique de l'IRSN a été construit.

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 2006	9
3.1.4 PREVISIONS POUR 2007-2008	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 2006	13
4.1.4 PREVISIONS POUR 2007-2008	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 2006	14
4.2.1.4 PREVISIONS POUR 2007	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 2006	16
4.2.2.4 PREVISIONS POUR 2007	16
5 LA SENSIBILITE DES BERGES DE RIVIERES	17
5.1 OBJECTIF	17
5.2 METHODOLOGIE	17
5.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006	18
5.4 PREVISIONS POUR 2007	18
6 LA SENSIBILITE DES RESSOURCES EN EAUX	18
6.1 OBJECTIFS	18
6.2 PREVISION POUR 2007	19
7 LA SENSIBILITE DU LITTORAL COTIER	19
7.1 OBJECTIFS	19
7.2 METHODOLOGIE	19
7.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006	19

7.4 PREVISION POUR 2007	20
8 LA SENSIBILITE DES PRODUCTIONS AGRICOLES	20
8.1 CAS DE LA SENSIBILITE DES PRODUCTIONS AGRICOLES A UN REJET ACCIDENTEL	20
8.1.1 OBJECTIF	20
8.1.2 METHODOLOGIE	20
8.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006	20
8.1.4 PREVISIONS POUR 2007	22
8.2 CAS DE LA SENSIBILITE DES LEGUMES A UN REJET CHRONIQUE	23
8.2.1 OBJECTIF	23
8.2.2 METHODOLOGIE	23
8.2.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006	23
8.2.4 PREVISIONS POUR 2007	25
9 LA SENSIBILITE ANTHROPIQUE DES TERRITOIRES	25
9.1 OBJECTIF	25
9.2 METHODOLOGIE	25
9.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006	26
9.4 PREVISION POUR 2007	27
10 INCERTITUDES, COMMUNICATION, PERCEPTION ET REPRESENTATION DES RESULTATS	27
10.1.1 OBJECTIF	27
10.1.2 METHODOLOGIE	28
10.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006	28
10.1.4 PREVISIONS POUR 2007	29
11 CONCLUSION	29
12 BILAN DES CONTRIBUTIONS AU PROJET SENSIB EN 2006	30
12.1 RAPPORTS IRSN ET DOCUMENTS INTERNES	30
12.1.1 Rapports diffusés	30
12.1.2 Rapports en cours de procédure AQ	30
12.1.3 Autres documents produits en 2006	30
12.2 PUBLICATIONS ECRITES (REVUES)	31
12.3 CONGRES (POSTERS ET COMMUNICATIONS ORALES)	31
12.4 AUTRES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	32

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. En 2006, les différentes études de caractérisation des facteurs de sensibilité de l'environnement (étapes 1 et 2 de la Figure 1), initiées en 2005, se sont achevées pour certaines ou se sont poursuivies pour d'autres. Un autre volet d'études traitant de l'évaluation de la contribution de chaque facteur à la sensibilité globale et des méthodes d'indilage (étapes 3 et 4 du projet) a été initié en 2006. L'ensemble de ces recherches progresse donc selon la méthodologie prévue pour SENSIB en vue d'obtenir une échelle de sensibilité radioécologique qui permettra la classification du territoire français.

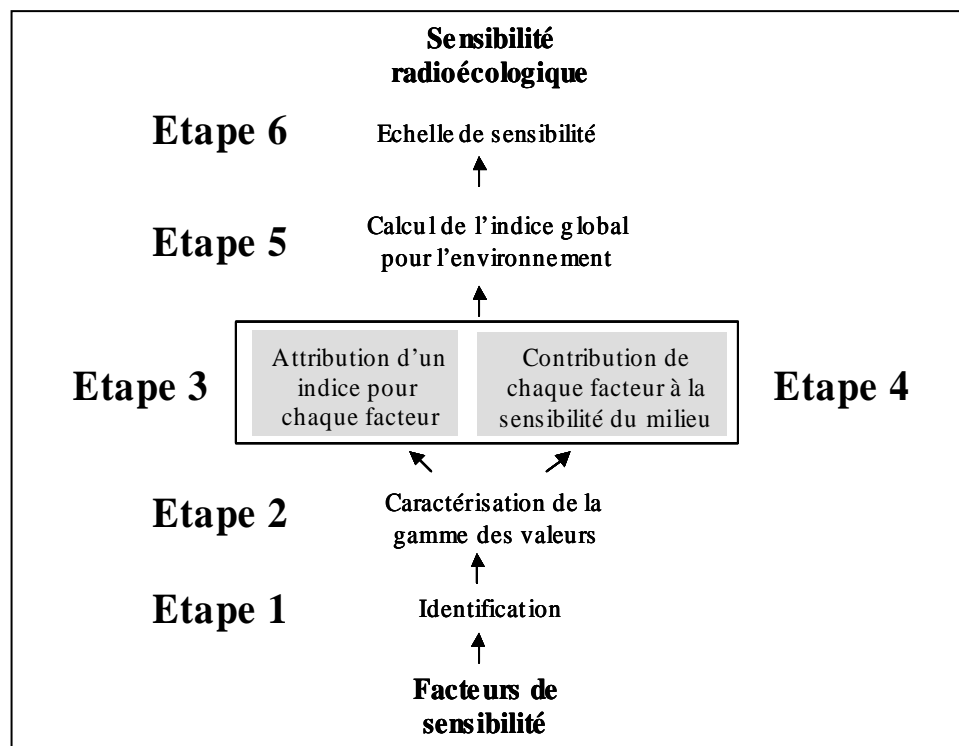


Figure 1 : Les étapes du projet SENSIB

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 Sûreté 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 continue. 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 : habitations, 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.

À chaque facteur de sensibilité, un indice, de 1 à 10 par exemple, est 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. Le système d'indication peut donc 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 de calcul qui part du rejet pour aboutir aux conséquences sanitaires, toxicologiques ou économiques. Cette contribution peut s'exprimer sous la forme de pourcentage. Par exemple, le facteur « précipitation moyenne annuelle » pourra avoir une contribution de 10 %, un facteur pédologique une contribution de 5 %, un facteur d'occupation du sol de 20 % à la sensibilité du milieu considéré. Cette phase 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 pondérés 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 sont effectuées, 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.

ETUDES APPLICATIVES :
Post-accidentel & Rejets chroniques INB

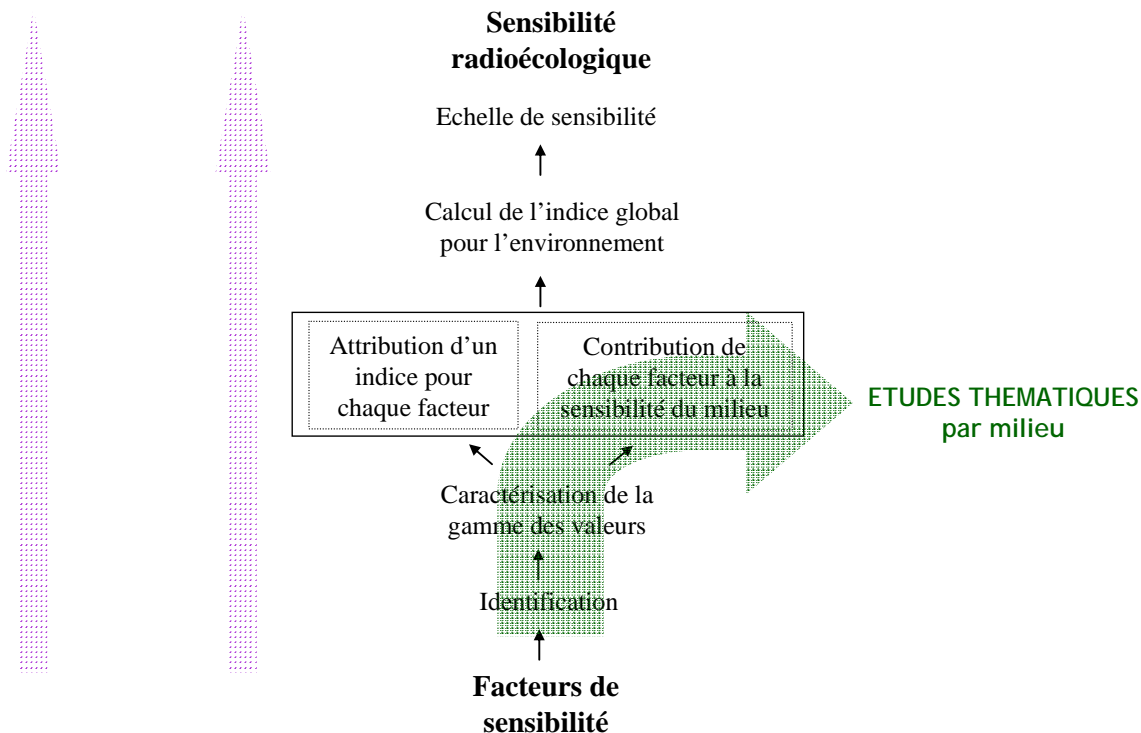


Figure 2 : Les études du projet SENSIB

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 il est rare que la caractérisation de l'état d'un territoire puisse se faire au travers d'un critère unique. 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 leur 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 : la valeur de différents indicateurs de sensibilité est obtenue ou en cours d'obtention pour différents sites. 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. Dans un premier temps (début 2007), l'exploration des méthodes multicritères dans le cadre de SENSIB sera menée en interne à partir d'un scénario de mise en œuvre d'une méthode ELECTRE pour le post-accidentel et en se substituant virtuellement au décideur chaque fois qu'il faut faire un choix (nombre et définition des critères, poids éventuels des critères). Dans un deuxième temps (à partir de l'été 2007) et en fonction de la décision du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (évaluation scientifique en cours et subvention éventuellement accordée au projet PRIME dans le cadre de l'appel d'offre Risque-Décision-Territoire 2006), l'implication d'un ou plusieurs décideurs sera envisagée 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 habituellement réalisé en routine sur des pas de temps de collecte mensuels. Longtemps abordées sous l'angle de valeurs moyennes,

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. 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 :

1. le type de précipitations (averse, ondée, neige, bruine, brouillard),
2. l'intensité de la pluie en distinguant les différentes phases au cours d'un même événement,
3. la durée de la précipitation,
4. l'origine des masses d'air (océanique, continentale, méditerranéenne),
5. la localisation géographique des événements climatiques,
6. la taille des particules et des gouttes,
7. l'intervalle de temps entre les précipitations qui conditionne la recharge de l'atmosphère en particules et en polluants,
8. la concentration en aérosols,
9. le taux de remise en suspension.

Ce travail fournira donc une classification des événements climatiques 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 est 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 permet 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, les dispositifs de collecte actuellement en place

sur le Puy de Dôme ont été complétés. Ces équipements permettront la collecte des aérosols afin 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 2006

Les premiers résultats des niveaux d'activité ont été obtenus à partir de la collecte d'aérosols durant l'hiver 2005-2006 et concernent l'activité du ^{137}Cs au Puy de Dôme (1465 m) et à Opme (660 m). Ce radionucléide est d'origine purement anthropique et se trouve actuellement majoritairement dans les sols. Une des questions était donc de savoir de quels sols provient ce radionucléide et de quelle façon il est remobilisé puis transporté (contribution 4 de la paramétrisation de la typologie à partir de l'origine des masses d'air).

Ces mesures ont permis d'observer que, parmi les points ayant un niveau d'activité plus élevé, il se distingue des périodes avec des niveaux d'activité comparables (entre Opme et le Puy de Dôme) et d'autres où l'activité du Puy de Dôme est plus importante qu'à Opme. En traçant les rétrotrajectoires des différentes périodes d'échantillonnage grâce à un code de calcul de l'U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration nommé HYSPLIT (<http://www.arl.noaa.gov/>), il a été observé que les augmentations des niveaux d'activité correspondent à des masses d'air provenant d'Afrique (bandes latitudinales 15° - 30°N occupées essentiellement par le Sahara) ou ayant une origine continentale (probablement liée aux retombées de Tchernobyl). Pour les zones d'Afrique, les radionucléides artificiels présents à l'état de trace à la surface des sols sont issus pour l'essentiel des retombées globales de l'ensemble des essais nucléaires. Les radionucléides issus de ces retombées sont en effet aisément disponibles puisque la couverture végétale est souvent réduite, voire absente. Il a été estimé que le transport des poussières sahariennes se faisait à 1,5 voire 2 km d'altitude, ce qui explique que nous puissions en retrouver au sommet du Puy de Dôme. Il a également été établi qu'en l'absence de précipitations, le panache pouvait se maintenir à cette altitude sur de longues distances (plusieurs milliers de kilomètres). Quant à l'origine continentale, les régions d'origine de ces masses d'air ont reçu notamment des dépôts de ^{137}Cs liés aux retombées de Tchernobyl et ont donc une activité surfacique dans les sols

localement importante. Finalement, cette hausse d'activité au sommet du Puy de Dôme (mais pas à Opme) suggère fortement un transport sur une longue distance.

Par ailleurs, des niveaux d'activités aussi élevés en plaine qu'en altitude ont été observés, traduisant une homogénéité apparente des concentrations dans le plan vertical, du moins en période hivernale. Ce constat va à l'encontre des attentes eu égard à la stratification thermique de l'atmosphère des basses couches durant l'hiver. Cela amène à considérer autrement la remise en suspension locale (contribution 9 de la typologie) ou la répartition granulométrique des niveaux d'activité (contributions 6 et 7 de la typologie). Différentes hypothèses ont été émises pour expliquer ce constat concernant la granulométrie des radionucléides ainsi que leurs affinités chimiques mais également sur l'apparente homogénéité verticale et sur les phénomènes prédominants en absence de remise en suspension locale.

3.1.4 PREVISIONS POUR 2007-2008

La validité de ces hypothèses sera étudiée en 2007 en regard de situations passées (de 2002 à 2005) pour lesquelles trois critères complémentaires seront examinés :

- l'étude d'une relation plus précise entre les masses d'air ayant survolé les zones continentales contaminées par les retombées de l'accident de Tchernobyl et l'augmentation des niveaux d'activités après passage de ces masses d'air en France,
- le rôle des précipitations durant le transport de ces masses d'air et l'augmentation des niveaux d'activité (contributions 1 à 3 et 7 de la typologie),
- l'influence de l'altitude moyenne à laquelle s'effectue le transport de ces masses d'air et l'augmentation des niveaux d'activité résultant sur les sites français (contribution 5 de la typologie).

La connaissance granulométrique acquise dans ce cadre nous permettra d'avancer un élément de réponse qui pourrait être couplé avec la composition chimique de l'aérosol de façon à déterminer une affinité chimique ou non et progresser dans la connaissance des contributions 6 et 8 de la typologie.

L'exploitation des mesures de la période estivale devrait aussi permettre de confirmer ou non l'homogénéité observée pendant l'hiver, cette question d'homogénéité étant un paramètre important dans la légitimité des coefficients de lessivage.

4 LA SENSIBILITE DES SOLS

Le sol est un compartiment central de l'environnement de par ses propriétés de collecte, de stockage, de redistribution des radionucléides vers les eaux de surface et les eaux souterraines et de transfert aux plantes. De ce fait, ce compartiment est beaucoup plus complexe que les autres à étudier du point de vue de la sensibilité radioécologique, car la sensibilité du sol provient de la combinaison de chacune de ces propriétés (indicateurs de sensibilité multiples) et chacune d'elles est déterminée par des facteurs de sensibilité différents.

- Si l'on considère le sol comme support de culture, la sensibilité d'un sol sera déterminée comme sa capacité à amplifier les transferts de polluants vers les plantes. 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 compartiment de stockage, un sol est sensible si les polluants ont tendance à s'y accumuler et c'est alors les caractéristiques du sol (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. Néanmoins, il n'est pas prévu d'étudier les facteurs de sensibilité spécifiques du stockage dans cette étape du projet SENSIB¹. 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 vis-à-vis de la contamination des nappes, un sol sera perçu comme sensible si les polluants y sont très mobiles. Le projet SENSIB s'intéresse alors aux caractéristiques hydrodynamiques du sol (facteurs de sensibilité) qui déterminent les fortes valeurs de flux vers les nappes (indicateur de sensibilité).
- Si l'on considère le sol comme terme source des polluants mesurables dans le cours d'eau à l'exutoire du bassin versant, c'est l'aléa érosif des sols qui est à considérer. 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, considéré eu égard à la mobilité des stocks de radioéléments ainsi que l'évolution de leur biodisponibilité, détermine 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 modélisation 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 radioécologiques (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 appliqués au compartiment « Sol » sont d'identifier les facteurs de sensibilité qui déterminent ces macro-

¹ Cette voie d'exposition est actuellement faible, mais dominante par rapport à l'ingestion pour le ¹³⁷Cs résiduel et peut être une voie d'exposition à prendre en compte pour d'autres polluants que les radioéléments (cas des sols pollués par les métaux).

paramètres, de renseigner 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 facteurs de sensibilité du 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 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 prévoir quels sont les territoires qui sont sensibles. Dans cette perspective, les stocks d'activités exportées par les productions agricoles (Chapitre 8 du présent rapport sur la sensibilité des productions agricoles) ne sont plus les seuls indicateurs pertinents de la sensibilité car il faut déterminer des indicateurs dynamiques comme le temps de résidence et la vitesse de migration et les corrélés au facteur de transfert du sol vers les plantes (herbe des prairies, champignons).

4.1.2 METHODOLOGIE

Le travail entrepris sur les sols des zones ateliers du Mercantour, du Jura et des Vosges permet de comparer les vitesses de migration des radioéléments artificiels (^{90}Sr , Pu et ^{241}Am) dans des sols qui diffèrent par leurs caractéristiques intrinsèques et le couvert végétal. Les premières données font état de différences de mobilité, en fonction du type de polluants et du type de sol. Cependant, l'identification des facteurs de sensibilité liés à la migration verticale dans les sols s'avère délicate. Par exemple, les fortes accumulations de ^{90}Sr dans la litière de forêt supposent un recyclage important des radioéléments les plus biodisponibles. Ainsi, la sensibilité des sols à la migration verticale doit comporter une composante ascendante liée aux transferts de la fraction biodisponible du sol aux végétaux.

Pour faire le lien entre le sol et les transferts aux végétaux et aux productions agricoles, une étude complémentaire sur la migration verticale dite « ascendante » a été proposée dont l'objectif est d'acquérir et de valoriser les données nécessaires pour comparer la sensibilité radioécologique de différentes zones de prairies et des filières laitières associées. On s'attachera dans cette étude à comparer et à expliquer la rémanence des polluants dans les sols et le transfert sol/herbe des produits de fission (^{90}Sr et ^{137}Cs) sur les zones étudiées (biodisponibilité des radionucléides artificiels et transferts spécifiques aux herbages). On évaluera également la sensibilité radioécologique des filières de productions fromagères, par la comparaison des transferts herbe/lait et lait/fromage sur les différentes zones d'étude. *In fine*, ce travail de thèse doit permettre de hiérarchiser ces transferts pour cibler si la

sensibilité des zones de prairie permanente est davantage le fait des transferts au sein des prairies ou des pratiques zootechniques ou des procédés de fabrication fromagère.

L'évaluation de la sensibilité est proposée à deux échelles d'observation : une échelle régionalisée (zone d'étude : prairies du Jura) et une échelle plus large, qui compare trois zones d'étude (ouest, centre et Jura). Dans le cadre de l'étude régionalisée, quatre zones d'études de la sensibilité ont été retenues, en fonction de l'altitude (plaine, premier plateau, second plateau, Monts du Jura). Pour chacune de ces entités, le fromage (AOC Comté) sera échantillonné dans une fromagerie. En tenant compte de la traçabilité de ce produit (origine du lait, délais d'affinage), le lait, l'herbe et le sol auront été échantillonnés au préalable dans les prairies correspondant à la fromagerie (sur 2 à 4 exploitations).

4.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006

Le travail sur la migration verticale, réalisé en 2005 (Solovitch-Vella *et al.*, 2006 ; Pourcelot *et al.* 2006) a été étendu pour tenir compte de la migration dite « verticale ascendante » dans le cadre d'une thèse. Le projet de thèse, préparé en 2005, a débuté à l'automne 2006 en collaboration avec le Laboratoire de Biologie de l'Environnement (Université de Franche-Comté). La revue des données disponibles et les éléments préliminaires pour la stratégie d'échantillonnage ont fait l'objet d'un rapport (Pourcelot, 2006).

4.1.4 PREVISIONS POUR 2007-2008

Les prélèvements dans le Jura seront effectués aux printemps 2007 et 2008. Dans le même temps, des prélèvements seront également réalisés sur les sites d'études de St Laurent-de-Céris et de Beaune-le-Froid (zones ouest et centre), afin de disposer de données qui permettent la comparaison des transferts entre les trois zones d'études. La stratégie d'acquisition des données tient compte de la traçabilité du fromage (surface de collecte et origine du lait, délais d'affinage des fromages).

En premier lieu, la confrontation des données de terrain avec le modèle dérivé des recherches expérimentales des transferts sol-herbe d'Absalom *et al.* (1999), ou de travaux comparables (Sanchez *et al.*, 1999 ; Smolders *et al.*, 1997), sera réalisée pour rechercher des indications et adapter ces modèles à la variabilité des sols de la présente étude.

Par la suite, il s'agira de dégager et de hiérarchiser les facteurs de sensibilité prépondérants du transfert sol-herbe (type de sol, minéralogie de la fraction fine, amendements éventuel, fréquence du labour ...). Au terme de cette étude, il peut apparaître, par exemple, que la sensibilité du transfert sol-herbe de prairie dépend essentiellement de la minéralogie de la fraction fine du sol et que les amendements jouent un rôle mineur.

On envisage également d'utiliser le modèle agronomique STICS, modèle de croissance des cultures à pas de temps journalier développé par l'INRA-Avignon (Brisson *et al.*, 2002), dans le but d'évaluer l'effet de la régionalisation des pratiques culturales sur le transfert racinaire à l'herbe.

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, K_d , ou un facteur de concentration). Ceci nécessite cependant quelques adaptations préalables : le K_d 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 2006

Comme annoncé dans les perspectives de 2005, deux prélèvements ont été réalisés pour chacun des 15 lacs du Mercantour (un prélèvement d'eau et un de mousses aquatiques), afin notamment d'étudier l'influence de la taille du bassin versant. Douze de ces lacs font partie du Parc National du Mercantour (lac Vert, lac Noir, lac Agnel, lac Saorgine, lac long supérieur,

lac d'Allos, lac Nègre, lac du Mercantour, lacs Bessons, lac Autier, lac Vens inférieur et lac Vens supérieur) et trois sont dans la région du Mercantour, mais en limite du parc (lac des Terres Rouges, lac Lausfer supérieur et Lac Lausfer inférieur). Les prélèvements d'eau ont été réalisés grâce à des cartouches imprégnées. La mesure gamma n'a pu être faite que pour la fraction dissoute car les eaux sont trop cristallines pour pouvoir récupérer des matières en suspension (fraction particulaire). Seul le césium 137 a été détecté avec une concentration moyenne d'environ 0,58 mBq.l⁻¹, avec des écarts selon les lacs entre 0,14 mBq.l⁻¹ et 2,46 mBq.l⁻¹.

En ce qui concerne les mousses, leur identification et la spectrométrie gamma ont été réalisées en 2006. La valeur moyenne mesurée pour le césium 137 est de 330 Bq.kg⁻¹ sec, avec des écarts selon les lacs entre 23 Bq.kg⁻¹ sec et 964 Bq.kg⁻¹ sec.

Quatre prélèvements et mesures ont aussi été réalisés dans deux lacs du Parc régional du Queyras (eau et mousse pour chacun des deux lacs : lac Foréant et lac des grands Laus).

4.2.1.4 PREVISIONS POUR 2007

En 2007, les données acquises sur le terrain seront analysées afin d'étudier l'influence de la taille du bassin versant sur les niveaux de ¹³⁷Cs mesurés en phase dissoute. Ces données seront confrontées avec un jeu de données de mesures dans des mousses acquis en 1997 dans les 15 mêmes lacs du Mercantour et dans les 2 mêmes lacs du Queyras.

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 ¹³⁷Cs, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am et ⁹⁰Sr, 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 2006

Le rapport SESURE 2006-11 (Duffa et Danic, 2006) présente les différents facteurs de sensibilités sous forme de cartes pour l'ensemble du bassin de la Peyne. A partir de ces données, plusieurs échantillons de sols ont été prélevés, afin d'étudier le poids du facteur présentant la plus large gamme de valeurs (dans cette étude : la pente). Les prélèvements ont été effectués le long de quatre lignes de pente différentes. Toutefois, lors de l'analyse des résultats, il s'avère difficile d'identifier la part des contributions respectives des différentes sources d'hétérogénéité, et notamment de s'affranchir des différences liées au dépôt initial. Ces résultats sont toujours en cours d'étude pour cette raison principale. D'autres mesures ont par ailleurs été effectuées, permettant d'évaluer le facteur correctif à appliquer sur les données d'érodibilité des sols en fonction de l'occupation du sol. En effet, ceux-ci montrent que la couche « érodable » d'un sol non remanié présente des concentrations en radionucléides artificiels 3 à 4 fois supérieures à celles que l'on mesure dans la même couche d'un sol remanié (sol cultivé ayant été labouré). Les cartes existantes sur l'érosion des sols devront donc être retravaillées en se reposant sur les données d'occupation des sols avant d'être utilisables pour notre problématique d'entraînement des radionucléides.

4.2.2.4 PREVISIONS POUR 2007

En 2007, il est proposé d'élargir le domaine spatial d'étude de la sensibilité à l'érosion en étudiant la sensibilité relative des bassins versants méditerranéens vis-à-vis des apports à la mer, suite à un dépôt radioactif. L'étude a pour objectif de classer les bassins versants méditerranéens en termes d'apport potentiel de radionucléides à la mer. Il s'agira d'une approche globale, basée sur des connaissances existantes. L'idée est d'obtenir une carte de la sensibilité des différents bassins versants méditerranéens, où l'on pourra représenter par un jeu de couleurs différentes classes de sensibilité (de peu sensible à très sensible). On cherche à établir une comparaison des sensibilités des différents bassins versants. Il ne s'agit pas ici de quantifier leur potentiel vis-à-vis de l'export de radionucléides, mais plutôt de les classer relativement les uns par rapport aux autres.

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 du 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 du 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 ripisylve², 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,

² Végétation des berges.

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

- mise en place de chaînes d'érosion³ 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 2006

Le choix de lieux d'implantation de zones ateliers des berges du Rhône pour leur suivi en termes d'érosion a été abandonné car le bilan des données bibliographiques a montré que la connaissance bibliographique conséquente méritait une exploitation approfondie préalablement à l'implantation de zones atelier. L'étude bibliographique effectuée (Maillet *et al.* en cours) a notamment permis (1) de résumer les connaissances théoriques sur le fonctionnement des plaines alluviales et la répartition des dépôts radioactifs en leur sein, et (2) de recenser l'ensemble des données déjà disponibles sur ou à proximité de la zone atelier préexistante du Bas-Rhône. Cette étude a permis de montrer que la sensibilité des berges à un rejet accidentel est globalement relativement faible par rapport à d'autres compartiments du fleuve (lit majeur) mais qu'il existe des facteurs potentiellement aggravants comme la concomitance d'un rejet accidentel et d'une crue de fréquence de retour supérieure à 10 ans. De plus, la connaissance des transferts potentiels avec la nappe au niveau des berges doit être approfondie pour évaluer la sensibilité des ressources en eau.

5.4 PREVISIONS POUR 2007

En 2007, il n'est pour l'instant pas prévu d'approfondir sur la sensibilité des berges puisque l'étude réalisée en 2005 et 2006 a montré que les enjeux associés à ce type de milieu étaient relativement faibles. Les moyens ont donc été reportés sur la thématique de la sensibilité des ressources en eaux qui constitue une nouvelle étude du volet fluvial de SENSIB (chapitre 6).

6 LA SENSIBILITE DES RESSOURCES EN EAUX

6.1 OBJECTIFS

Les ressources en eaux sont en quantité limitée. Leur préservation est un enjeu essentiel car les activités humaines et la vie naturelle en sont largement tributaires. Or la sensibilité à plus ou moins long terme des ressources en eaux à une contamination radioactive en fonction des usages reste difficile à appréhender, tout particulièrement en situation post accidentelle

³ Instrument de terrain permettant de quantifier l'érosion ou le dépôt sur les berges des rivières.

(rejets atmosphériques ou rejets liquides). L'étude proposée a pour principal objet d'évaluer les doses induites à l'homme via l'utilisation des ressources en eaux, soit directement par exposition interne (eaux de boisson) ou externe (eaux de baignade), soit indirectement à partir de la consommation de produits contaminés par l'eau (irrigation, abreuvement).

Le poids relatif de ces différents modes d'exposition devra être évalué à partir des données existantes relatives aux usages de l'eau à l'échelle du territoire ou d'une région ainsi que sur la base de scénarii. Parallèlement, une classification de la sensibilité des systèmes aquatiques en fonction des différents usages potentiels de l'eau sera établie.

6.2 PREVISION POUR 2007

La méthodologie de cette étude sera définie en 2007 et un contrat postdoctoral est en cours de préparation sur ce sujet.

7 LA SENSIBILITE DU LITTORAL COTIER

7.1 OBJECTIFS

Dans le domaine marin, les pollutions ont toujours eu un impact fort sur les populations côtières. Un littoral souillé par un polluant engendre inexorablement une perturbation des écosystèmes et des risques importants pour les populations et les pertes économiques pour la région touchée sont souvent importantes du fait des dommages subis par les secteurs du tourisme, de la pêche, des cultures marines. Dans ce contexte, le concept de sensibilité de l'environnement a été mis à profit notamment par l'IFREMER pour élaborer des atlas de vulnérabilité des zones côtières (Denis, 1997). L'extension de la méthodologie de l'IFREMER au cas des polluants radioactifs est l'un des enjeux de SENSIB pour les prochaines années (Duffa et al, 2007).

7.2 METHODOLOGIE

La méthodologie doit faire l'objet de développement en 2007

7.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006

En 2006, le LERCM a proposé une contribution du projet SENSIB-Mer au projet CLARA II piloté par Gilles Dusserre de l'Ecole des Mines d'Alès pour le programme PRECODD de l'ANR. Cette contribution consiste à caractériser les zones sensibles à la pollution et proposer une méthode de construction d'un indice de sensibilité spatialisé. Le projet CLARA II se positionne dans le contexte de gestion de crise, et plus précisément dans un objectif de prévision et d'aide au diagnostic dans un contexte de pollution accidentelle en milieu marin. Le projet CLARA II doit aboutir à la création d'un outil de simulation permettant de prévoir la localisation d'un contaminant, ainsi que l'évolution de sa concentration dans la mer et dans l'atmosphère lors d'un déversement massif de polluant en Méditerranée. Il permettra de connaître les distances d'effets dans le cas d'un incendie, de renseigner sur les capacités de bioaccumulation de certains organismes marins et fournira des indices de sensibilité selon les zones polluées. Ce

projet fédère un consortium composé de laboratoires de recherche académique, d'industriels, des services de l'état et d'une PME. Sa durée de quatre ans est plus large que celle du projet SENSIB et CLARA II intégrera donc la contribution de SENSIB-Mer.

7.4 PREVISION POUR 2007

La réunion de lancement du projet CLARA II aura lieu en 2007. La méthodologie de SENSIB-Mer sera précisée durant l'année 2007 (Duffa et al, 2007).

8 LA SENSIBILITE DES PRODUCTIONS AGRICOLES

8.1 CAS DE LA SENSIBILITE DES PRODUCTIONS AGRICOLES A UN REJET ACCIDENTEL

8.1.1 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.

8.1.2 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 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 éventuellement de translocation, lorsque les parties consommées ne sont pas celles qui reçoivent le dépôt. 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.

8.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006

Extension de l'étude sur les productions céréalières

En 2006, les résultats de l'étude de 2005 sur la sensibilité radioécologique du blé d'hiver (Delboe et Mercat-Rommens 2005) ont été généralisés à l'ensemble des céréales françaises.

La sensibilité radioécologique des céréales dépend principalement de deux facteurs de sensibilité :

- la date de floraison qui détermine le moment de vulnérabilité des grains,
- le rendement qui détermine la quantité de grains contaminés.

En ce qui concerne le premier facteur de sensibilité, une collaboration avec Arvalis-Institut du végétal a été mise en place pour obtenir une cartographie des dates de floraison des principales céréales françaises, à l'échelle de tout le territoire. Il s'agit notamment de réaliser une interpolation des dates de floraison obtenues par modélisation agronomique sur environ 300 points du territoire correspondant aux stations suivies par Arvalis en termes de climatologie.

Le deuxième facteur de sensibilité a été traité en parallèle par une exploitation géostatistique des données de rendement d'Agreste. Dans un premier temps, les valeurs de rendements, connus à l'échelle départementale, ont été croisées spatialement avec les polygones d'influence (ou polygones de Voronoï) correspondant aux 300 stations d'Arvalis, pour obtenir des données à la même échelle spatiale que les dates de floraison attendues d'Arvalis. Dans un deuxième temps, l'utilisation d'un indicateur géostatistique a été testée pour proposer une méthode d'agrégation pertinente des polygones (Mercat-Rommens et al., 2006). Cet indicateur est basé sur la statistique de LISA (Local Indicator of Spatial Association dont on renforce la significativité par un test statistique dit de Moran (Moran 1950) (Anselin 1995). Cet indicateur permet de mettre en évidence des clusters spatiaux de la variable «rendement cultural», c'est-à-dire des zones homogènes de productions plus ou moins intensives de céréales. Cette analyse géostatistique a notamment permis de réaliser une cartographie de la vulnérabilité des céréales à une contamination radioactive qui fait apparaître clairement les tendances régionales.

Etude de la sensibilité régionale des prairies permanentes

L'objectif de cette étude consiste à évaluer la sensibilité de l'amont de la filière laitière vis-à-vis d'un rejet radioactif accidentel. Il s'agit de savoir si un dépôt uniforme et ponctuel entraînerait une contamination identique de l'herbe issue d'une prairie permanente à l'échelle du territoire national. Pour cela l'étude a suivi la méthodologie décrite au paragraphe 8.1.2. La voie de transfert d'ASTRAL sur laquelle l'étude s'est concentrée est le transfert du dépôt au lait, via l'ingestion d'herbe de pâture. La sensibilité de cette voie de transfert dépend des paramètres de captation, de rendement, des quantités quotidiennement ingérées par les vaches laitières et des dates de mise à l'herbe. La méthodologie a donc consisté à régionaliser ces paramètres en exploitant notamment des données de terrain. Le logiciel STICS, développé par l'INRA d'Avignon a été ensuite utilisé.

Cette étude a permis d'évaluer l'effet de la régionalisation de certains paramètres du modèle ASTRAL sur l'activité massique des fourrages issus d'une prairie permanente, soumise à un dépôt atmosphérique accidentel. Ce travail a notamment permis de montrer toute la richesse du couplage entre un modèle radioécologique comme ASTRAL et un modèle de culture comme STICS. Ce couplage permet de confronter les valeurs de paramètres génériques utilisées dans

ASTRAL aux valeurs issues de STICS en prenant en compte certaines sources régionales de variabilité : climat, type de sol, système de culture et constitue donc une voie d'amélioration de la connaissance des paramètres utilisés en radioécologie.

Au terme de cette étude (Durand et Mercat-Rommens, 2006) (Durand *et al.*, en cours), une tabulation opérationnelle des paramètres d'ASTRAL permettant de calculer l'ampleur d'une émission atmosphérique accidentelle de radioactivité qui prenne en compte les variabilités régionales a pu être proposée. La régionalisation des rapports de captation rend compte d'une part de décalages entre les cycles de différentes régions et d'autre part, dans le cas de la captation par temps humide, de différences dans l'ampleur des transferts. De plus, la comparaison entre les valeurs de transfert recalculées à la suite des sorties de STICS et celles d'ASTRAL a mis en évidence un écart pouvant atteindre un facteur 3 dans le cas du facteur de transfert direct par temps sec (FTds) et un facteur 10 dans le cas du facteur de transfert direct par temps de pluie (FTdh). L'étude du rendement a permis de mettre en évidence l'importance de ce paramètre dans l'estimation de la contamination de l'herbe de pâture et la nécessité de réactualiser la valeur tabulée dans ASTRAL.

Par ailleurs, cette étude a permis de regrouper de nombreuses informations sur les pratiques culturales des prairies permanentes et sur les pratiques d'élevage actuelles en France qui peuvent être utiles au-delà du projet SENSIB. En effet, la gestion des conséquences d'une pollution radioactive repose aussi sur la crédibilité du dialogue technique entre les experts institutionnels et les filières agro-alimentaires. La bonne connaissance des pratiques est alors un élément indispensable de ce dialogue.

8.1.4 PREVISIONS POUR 2007

Les résultats de la collaboration avec Arvalis sont attendus pour 2007 sous la forme d'un rapport incluant des séries de trois cartes des dates de floraison pour les principales céréales françaises (blé d'hiver, blé de printemps, orge d'hiver, orge de printemps, maïs) : une carte médiane, une carte avec la date la plus précoce possible (percentile 5) et une carte avec la date la plus tardive possible (percentile 95). Une réflexion interne à l'IRSN/DEI sera menée sur le format de restitution utilisable dans le contexte de la gestion post-accidentelle.

Une nouvelle action sera initiée en 2007 pour améliorer la connaissance de l'occupation du territoire autour des centrales nucléaires françaises à partir d'enquêtes de terrain. Par occupation du territoire, on entend principalement l'occupation agricole des sols (type de productions végétales, présence et caractérisation des troupeaux, pratiques en termes d'irrigation) et l'utilisation des ressources en eau (captages AEP, puits, forages ...). Dans un second temps, les enquêtes pourront être étendues aux pratiques locales en termes d'alimentation et notamment d'autoconsommation.

Les données obtenues auront un fort intérêt à la fois dans un contexte d'accident nucléaire (dimensionnement et mise en place de contre-mesures ...) mais aussi dans le contexte d'évaluation plus réaliste des risques associés aux rejets chroniques.

En 2007, il est proposé de réaliser une étude préalable de la faisabilité d'enquêtes de terrain avant déploiement éventuel sur tous les sites nucléaires EDF. Il s'agit, d'une part, d'acquérir les divers outils (logiciel de référencement nomade, fonds de carte ...) permettant de travailler sur le terrain et d'autre part, de les mettre en œuvre à titre expérimental autour des centrales de Chooz et du Tricastin à la fois pour l'occupation agricole et pour le recensement des ressources en eaux.

La problématique de l'étude régionalisée de la contamination accidentelle d'une production agricole sera étendue au cas de la vigne et du vin, voire à d'autres productions agricoles (riz, élevages avicoles ...).

8.2 CAS DE LA SENSIBILITE DES LEGUMES A UN REJET CHRONIQUE

8.2.1 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.

8.2.2 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 (m².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).

8.2.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006

En 2006, un bilan complet de l'étude de l'ensemble des résultats de mesures environnementaux de la série de données a été réalisé. Les tests statistiques sur les

différentes estimations obtenues ont confirmé les résultats de 2005, à savoir une mauvaise significativité statistique des résultats.

Le traitement de ces données confirme 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.

Ce traitement statistique a permis aussi de justifier les améliorations suivantes de la stratégie d'acquisition des données environnementales :

- effectuer des mesures hebdomadaires (ou journalières) du dépôt, ou se donner les moyens de reconstituer les valeurs du dépôt à cette échelle de temps.
- renseigner lors du prélèvement certaines caractéristiques précises du végétal (stade de développement), du sol (nature du sol, masse volumique) et la localisation temporelle et spatiale de l'échantillon. A l'heure actuelle, les prélèvements réalisés au LERCM dans le cadre des études de terrain et stockés dans la base de données SYLVESTRE remplissent le plus souvent ces conditions. Les caractéristiques suivantes sont notamment référencées : date, lieu, coordonnées GPS, masse volumique et certaines caractéristiques du sol (pour environ un tiers des échantillons de légumes feuilles). Depuis quelques années, pour certains échantillons, le stade de développement du végétal est aussi précisé en commentaire (plant, maturité, stade monté).

Le volet complémentaire de cette étude a démarré sur 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. La méthode retenue pour ce post-traitement est la méthode CART acronyme de Classification And Regression Trees (Breiman 1984) et le scénario d'application relève du contexte post-accidentel.

La méthode CART est non paramétrique et permet de construire des arbres de régression ou de classification selon que la variable à expliquer est quantitative ou qualitative. Les arbres

fournis pas CART sont obtenus par partitionnement récursif binaire. Les nœuds parents sont toujours divisés en deux nœuds descendants (intermédiaire ou terminal) et ce processus est réitéré en considérant chaque nœud intermédiaire comme un nœud parent. Ainsi, chaque branche de l'arbre représente une combinaison différente de variables explicatives. La lecture de l'arbre s'effectue de la racine (nœud t) et par une série de question oui/non, on aboutit à un nœud terminal affecté à la modalité majoritaire de la variable Y à expliquer.

8.2.4 PREVISIONS POUR 2007

Le taux de mal classés actuellement obtenus dans les nœuds terminaux est assez élevé. Le choix des valeurs seuils pour les modalités de Y est pour l'instant fait arbitrairement selon les limites réglementaires fondées sur une approche dosimétrique. Actuellement, nous travaillons sur le codage de la variable Y, pour rechercher quel pourrait être le « meilleur », celui pour lequel le taux d'observations mal classées est le plus faible possible. Une méthode est actuellement développée, basée sur le couplage de la méthode CART et de l'algorithme génétique qui est une méthode d'optimisation, permettant de trouver l'optimum global d'une fonction objectif (le taux de mal classés dans notre cas) par l'évolution d'une population de solutions potentielles. Les résultats attendus nous permettraient non seulement de diminuer le taux de mal classés mais aussi de proposer des bornes de classification des valeurs de la contamination d'un légume définies à partir du fonctionnement de l'environnement.

9 LA SENSIBILITE ANTHROPIQUE DES TERRITOIRES

9.1 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.

9.2 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.

9.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006

Une revue méthodologique des enquêtes alimentaires en France a été effectuée (Durand *et al.* en cours) afin d'explicitier les différences méthodologiques entre les différents types d'enquêtes et notamment d'identifier les particularités des méthodes d'enquête et d'échantillonnage des études alimentaires réalisées au voisinage des sites nucléaires. Il s'agissait notamment de replacer l'enquête alimentaire réalisée autour du site du Tricastin dans le contexte de l'observation des comportements alimentaires pouvant exposer plus particulièrement la population aux rayonnements ionisants. Une enquête nationale a pour vocation d'obtenir un panorama complet et représentatif de l'ensemble des comportements alimentaires de la population alors que, dans le cas d'une enquête réalisée pour préciser les paramètres d'une étude d'impact, une enquête de rations alimentaires et d'autoconsommation sera nécessaire pour rendre compte plus précisément des doses les plus importantes pouvant être reçues par les personnes exposées aux rejets radioactifs, liquides et gazeux, provenant des installations nucléaires situées à proximité. Les enquêtes constituent un outil particulièrement précieux pour les nutritionnistes comme pour les acteurs du secteur nucléaire. Compte tenu du risque d'erreurs qui peuvent entacher les résultats, elles nécessitent une méthodologie rigoureuse, une expérience importante et du personnel bien entraîné.

Les enquêtes de consommation alimentaire s'inscrivant de plus en plus dans un cadre de surveillance et d'évaluation des risques alimentaires et nutritionnels de la population, une harmonisation de leur méthodologie semble nécessaire car plusieurs limites peuvent être rencontrées lors de ces enquêtes et lors des comparaisons entre différentes enquêtes :

- limites liées à la définition d'une portion (contenu et plat),
- limites liées à la définition des groupes d'aliments,
- limites liées à la méthodologie de recueil des données. Chaque méthode a ces propres erreurs de mesures (mémoire de l'individu, modification du comportement du sujet dans le cadre d'un enregistrement de l'alimentation : le sujet amené à remplir le semainier au jour le jour va avoir tendance à éliminer de ses consommations les aliments ayant une image négative et inversement favoriser ceux bénéficiant d'une connotation positive),
- limites liées à la prise en compte de la saisonnalité.

Par ailleurs, dans le cas des enquêtes alimentaires autour des sites industriels, les enquêteurs peuvent rencontrer des problèmes particuliers, entraînant parfois des difficultés dans l'interprétation des résultats des enquêtes. Les principaux problèmes rencontrés sont les suivants :

- le degré de représentativité des résultats disponibles pour la population étudiée,
- la possibilité de réaliser des comparaisons de régimes alimentaires issus d'enquêtes différentes car les échantillonnages peuvent être très différents,
- l'absence d'information sur la provenance des aliments consommés. Or l'autoconsommation, qui correspond à la consommation d'aliments frais produits par le consommateur ou son voisinage, varie fortement avec la zone d'habitation et la profession,
- la difficulté d'acquérir des données spécifiques pour les régimes alimentaires de jeunes enfants.

Cette revue a permis d'illustrer la diversité des enjeux associés à la connaissance de la sensibilité anthropique des territoires et les difficultés d'acquisition et de traitement de cette connaissance.

9.4 PREVISION POUR 2007

Le travail d'exploitation approfondi des données de l'enquête prévu initialement en 2006 a donc été reporté en 2007. En particulier, l'analyse des données concernant les pratiques d'autoconsommation, avec une comparaison des habitudes en milieu rural et citadin en confrontant avec l'étude réalisée à Marcoule en 1998, sera réalisée en 2007.

10 INCERTITUDES, COMMUNICATION, PERCEPTION ET REPRESENTATION DES RESULTATS

10.1.1 OBJECTIF

Les travaux successivement menés en France sur la gestion des situations post-accidentelles montrent qu'il est indispensable qu'elle s'appuie sur une caractérisation anticipée de l'état radiologique de l'environnement, abordée de manière globale et selon une stratégie prenant en compte les habitants et leurs conditions de vie. Ce volet du projet SENSIB a donc pour objectif de développer un outil simple à mettre à la disposition des responsables et de la société civile permettant le choix méthodique des actions à entreprendre et leur compréhension par tous, lorsque sont en jeu simultanément des critères sanitaires, économiques, écologiques, voire sociétaux. C'est dans ce cadre que l'application PRIME a été construite en 2006.

L'objectif du projet PRIME est de développer, en concertation entre les experts, les acteurs de la décision et les représentants du territoire, une méthode d'analyse multicritères de caractérisation du territoire contaminé, utilisable par les gestionnaires du risque lié à un

accident industriel impliquant des substances radioactives. La méthode sera basée sur la hiérarchisation des facteurs de la sensibilité radioécologique d'un territoire vis-à-vis d'une pollution radioactive. Les facteurs de la sensibilité radioécologique d'un territoire sont définis comme l'ensemble des paramètres environnementaux et anthropiques (utilisation du territoire par l'homme) qui influencent (aggravent ou limitent) les conséquences d'une pollution radioactive.

Le projet PRIME est conçu comme un partenariat entre laboratoires scientifiques (IRSN et autres instituts experts du risque, Université Paris Dauphine/LAMSADE, ...), représentants des pouvoirs publics (ASN/DRIRE-Rhône Alpes, Préfecture, Mairie) et représentants de la société civile (Commissions Locales d'Information). Ce projet sera l'occasion d'explorer des formes de coopération innovantes dans le cadre d'un volet « concertation ».

Les exemples d'application pratiques des méthodes multicritères d'aide à la décision sont encore relativement rares car historiquement les outils d'aide à la décision classique de type monocritère ont été préférés. L'analyse multicritères sera utilisée ici de façon originale puisqu'elle servira à expliciter les critères de l'évaluation environnementale (indicateurs de sensibilité) qui supportent la décision, en partenariat avec les parties prenantes. Le relevé exhaustif des facteurs de sensibilité proposés par les parties prenantes et leur examen systématique devraient éliminer certaines des limites de l'utilisation de ces méthodes observées par le passé lorsque les facteurs étaient listés unilatéralement par les experts et rapidement remis en question par les autres acteurs.

10.1.2 METHODOLOGIE

Le projet PRIME sera structuré selon les principales étapes suivantes :

- La délimitation de la zone d'étude en Basse Vallée du Rhône, de l'échelle de temps et des indicateurs de la sensibilité du territoire,
- l'identification, en relation avec les parties prenantes locales, des facteurs de sensibilité à considérer pour évaluer les indicateurs de la sensibilité,
- la caractérisation des gammes de valeurs des indicateurs pour le territoire d'étude (utilisation des modèles radioécologiques),
- l'élaboration d'une grille d'indicateurs pondérés selon des gammes de valeurs discutée avec les parties prenantes (analyse multicritères),
- la discussion avec les parties prenantes locales des résultats obtenus, en vue de répondre à leurs préoccupations et de faciliter les décisions.

10.1.3 RESULTATS ACQUIS EN 2006

Le projet PRIME a été conçu en 2006 ; recherche des partenariats et élaboration du dossier de présentation du projet pour l'évaluation scientifique et le financement éventuel par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD) dans la cadre du programme « Risque-Décision-Territoire 2006 ».

10.1.4 PREVISIONS POUR 2007

En fonction de la décision du MEDD, le projet PRIME sera lancé en 2007.

11 CONCLUSION

En 2006, le projet SENSIB a pris de l'ampleur. D'une part, les études thématiques visant à caractériser dans chaque milieu ou compartiment de l'environnement les facteurs de sensibilité se sont poursuivies, voire étendues à d'autres compartiments des écosystèmes (cas des ressources en eau et du milieu marin). D'autre part, des études sur les méthodes et outils disponibles, pour fédérer les facteurs de sensibilité des différents milieux (analyses multicritères) ou gérer les changements d'échelle spatiale (indicateur géostatistique), ont été engagées. Ce deuxième axe de recherche devrait s'amplifier en 2007 pour pouvoir concrétiser l'outil méthodologique finalisé de SENSIB.

Concernant les études applicatives du projet SENSIB (deux applications sont en cours : la gestion de situations post-accidentelles et les pollutions associées aux rejets chroniques des INB), des moyens supplémentaires ont été affectés en 2006 et prévus en 2007 sur l'application au contexte post-accidentel (milieu marin, projet PRIME) pour répondre aux besoins de la DEI.

Enfin, un groupe de travail international sous l'égide de l'IUR (International Union of Radioecology) a été lancé en décembre 2006 pour étendre à un niveau international la réflexion sur le concept de sensibilité radioécologique et son utilisation pour développer des outils opérationnels de caractérisation de la vulnérabilité du territoire.

12 BILAN DES CONTRIBUTIONS AU PROJET SENSIB EN 2006

12.1 RAPPORTS IRSN ET DOCUMENTS INTERNES

12.1.1 RAPPORTS DIFFUSES

- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2006-01 : Projet SENSIB : Etude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur une prairie permanente. V. Durand et C. Mercat.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2006-02 : Projet SENSIB : Rapport d'avancement 2005, C. Mercat et collaborateurs.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2006-07 : Utilisation de séries de mesures environnementales pour étudier la sensibilité régionale de la contamination végétale aux rejets chroniques - Projet SENSIB. B. Briand et C. Mercat.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2006-11 : Entraînement et redistribution des radionucléides sur le bassin versant de la Peyne - rapport préliminaire. C. Duffa et F. Danic.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2006-28 : Sensibilité des zones de prairies permanentes. L. Pourcelot.

12.1.2 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 2006-48 : Projet SENSIB : simulations avec le modèle agronomique STICS pour l'étude de la culture de la laitue. V. Durand, B. Briand, C. Mercat.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2006-49 : Méthodologie des enquêtes alimentaires menées autour des installations nucléaires. V. Durand et C. Mercat.
- Rapport DEI/SESURE/LERCM 2007-XX : Sensibilité radioécologique des berges - étude liminaire. G. Maillet, F. Eyrolle et C. Mercat.

12.1.3 AUTRES DOCUMENTS PRODUITS EN 2006

- Dossier de présentation de PRIME pour MEDD-Programme RDT2006.
- Dossier de présentation de CLARAI pour ANR-Programme PRECODD.
- Compte rendu du 29 juin 2006 du comité de suivi de la thèse de B. Briand. Chrono LERCM n°2006-052.
- Compte-rendu du 13 septembre 2006 du comité de suivi de la thèse de B. Besson. Chrono LERCM n°2006-087.

- Compte rendu de mission à Chooz par V. Durand et D. Claval. Etude de faisabilité de l'acquisition de données sur l'occupation des sols autour des CNPE. Chrono LERCM 2006-106.
- Compte rendu de mission à Privas par C. Mercat. Exercice de crise de Cruas au PCF. Chrono LERCM 2006-102.
- Compte rendu de mission Rencontre Arvalis pour SENSIB du 23/11/06. Chrono LERCM 2006-124.
- Article pour journées des thèses L. Bourcier.
- Article pour journées des thèses B. Briand.
- Mémoire C. Mercat sur le bilan des méthodes multicritères et de leurs intérêts pour SENSIB à partir de la lecture de Maystre et al. 1994 (Méthodes multicritères ELECTRE).
- Mémoire C. Mercat et J. Guillevic sur la proposition de collaboration LVRE/LERCM dans le cadre du projet SENSIB : audit géostatistique d'un réseau de surveillance en vue de l'optimisation de la caractérisation de la sensibilité radioécologique du territoire.
- Manifestation d'intention pour post-doc « Analyse des modes d'implication des parties prenantes dans la caractérisation de l'état du territoire suite à une pollution radioactive accidentelle ».
- Manifestation d'intention pour post-doc « Sensibilité des systèmes aquatiques continentaux - Doses induites par l'utilisation des ressources en eau ».
- Site internet du projet SENSIB sur le site scientifique de l'IRSN.

12.2 PUBLICATIONS ECRITES (REVUES)

- 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 d'édition.
- V. Durand, C. Mercat-Rommens, P. Curmi, M. Benoit, B. Briand. Modelling regional impacts of radioactive pollution on permanent grassland. Accepted in Journal of agronomy.

12.3 CONGRES (POSTERS ET COMMUNICATIONS ORALES)

- L. Bourcier, O. Masson, P. Paulat, K. Sellegri, G. Cautenet. Influence de l'origine des masses d'air sur le niveau d'activité en ^{137}Cs dans l'atmosphère. Journées des thésards et post-doctorants du CEA Cadarache. 15 juin 2006.

- L. Bourcier, K. Sellegri, O. Masson, G. Aymoz, JM. Pichon, P. Chausse, P. Paulat, P. Laj and G. Cautenet. Sources of ^{137}Cs at the Puy de Dôme high altitude site. International conference in celebration of the 75th anniversary of the High Altitude Research Station Jungfrauoch - Interlaken, Switzerland, September 11-14, 2006
- B. Briand, G. Maillet, C. Mercat. Le concept de sensibilité radioécologique appliqué à la gestion des risques nucléaires. Journées des thésards et post-doctorants du CEA Cadarache. 15 juin 2006.
- B. Briand, G. Maillet, C. Mercat. Le concept de sensibilité radioécologique appliqué à la gestion des risques nucléaires. Colloque de radioécologie IRSN-EDF, Cadarache. 23 juin 2006.
- B. Briand, C. Mercat-Rommens, G. Ducharme. Intérêt et limite de la biostatistique pour la radioécologie de terrain. Journées Françaises de la Statistique 2006. Clamart.
- B. Briand, C. Mercat-Rommens. Difficulties and lessons of environmental data processing to fit modeling parameters. Congrès SETAC 2006 The Hague (Netherlands).
- V. Durand, F. Vray, C. Mercat-Rommens, Improving the knowledge of exposure by ingestion thanks to food surveys, International ISEE/ISEA conference, Paris, 2-8 september 2006
- C. Mercat-Rommens, JM Métivier, B. Briand, V. Durand. How geostatistics can help in predicting contamination of cereals. Conference on geostatistics for environmental applications, 25-27 October 2006, Rhodes (Greece).
- C. Mercat-Rommens, E. Chojnacki, C. Baudrit, Ce que les théories de l'incertain peuvent apporter à l'évaluation des risques. Congrès $\lambda\mu 15$, Lille 10-12 octobre 2006.
- C. Mercat-Rommens, E. Chojnacki, C. Baudrit, Uncertainties: New ways to take them into account, Second European IRPA Congress on radiation protection, Paris, 15-19 May 2006
- C. Mercat-Rommens, A. Sugier, Le Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, une expérience scientifique d'expertise pluraliste. Conférence les nouveaux outils pour décider ensemble. Université Paris-Dauphine, 2-3 novembre 2006.

12.4 AUTRES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

L. Breiman, J.H. Friedman, R. Olshen, and C.J. Stone, 1984. Classification and Regression Trees, Wadsworth, Belmont CA.

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, 2005. 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. Mourlon 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.