

**Lancement du projet « Sensibilité
Radioécologique »**

C. MERCAT-ROMMENS & P. RENAUD

**Service d'Etude et de SURveillance de la Radioactivité dans
l'Environnement**

Rapport DEI/SESURE n° 2003-02

Novembre 2003



INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'INTERVENTION

77-83, av. du Général-de-Gaulle 92140 CLAMART - Standard (33) 01 58 35 88 88

Demandeur	
Référence de la demande	
Numéro de la fiche d'action	

Lancement du projet « Sensibilité Radioécologique »

Réf. : DEI/SESURE 2003-02

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur *	Chef d'Unité	Chef de la DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	C. MERCAT	C. DUFFA	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	07/11/03	07/11/03	25/11/03	26/11/03	
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

RESUME

Ce rapport présente le projet « Sensibilité Radioécologique » qui va être développé au LERCM à partir de 2004. L'objectif du projet est de créer un outil normalisé qui permette de représenter et de hiérarchiser avec une même échelle de valeur, la sensibilité des différents milieux environnementaux. La méthodologie, ainsi que les principaux résultats attendus, sont discutés et illustrés à partir d'exemples simplifiés. Ce projet fournira de l'information dans le cadre de l'évaluation et de la gestion des risques, pour l'homme et pour l'environnement, à toutes les étapes de la vie d'une activité industrielle.

ABSTRACT

This report presents the project "Radioecological Sensitivity" which will be developed by the LERCM in 2004. The objective of the project is to create a standardized tool which makes it possible to represent and to compare with the same scale the sensitivity of various ecosystems. Methodology as well as the principal results awaited are discussed and illustrated with simplified examples. This project will provide information in the framework of risk assessment and risk management, for the man and the environment, at all the stages of the life of an industrial activity.

MOTS-CLES

Projet, sensibilité radioécologique, environnement, installation nucléaire

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET OBJECTIF	4
2. ENJEUX	5
3. DEFINITIONS	6
4. ETAT DE L'ART.....	7
4.1. Forum « Radioecological Sensilivity »	7
4.2. Exemples d'utilisation des concepts de sensibilité et de vulnérabilité	8
5. METHODOLOGIE PROPOSEE	9
6. CONCLUSION	11
7. LISTE DES FIGURES.....	11
8. BIBLIOGRAPHIE	11
ANNEXE : EXEMPLES.....	13

1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Les conséquences pour l'homme et l'environnement d'une pollution d'origine industrielle dépendent de l'importance et de la nature de celle-ci, mais aussi de l'environnement qui la reçoit. Qu'elles s'expriment en termes économiques, de toxicité ou de risque sanitaire, ces conséquences seront plus ou moins pénalisantes suivant les caractéristiques du milieu touché et suivant l'usage qu'en fait l'homme.

Ainsi, les différents milieux : urbains, agricoles, forestiers, fluviaux, lacustres, marins ou d'altitude, présentent des sensibilités différentes vis-à-vis d'une pollution. Par exemple, la sensibilité des milieux urbains est liée à la densité de population, aux surfaces artificielles et autres équipements urbains qui tendent à concentrer les polluants sur certaines surfaces ou matrices. Celle des espaces agricoles provient de l'atteinte de la chaîne alimentaire par contamination du sol, des plantes cultivées et des animaux d'élevage. Les espaces naturels, notamment les espaces forestiers sont connus pour entretenir la rémanence des polluants qui y sont en permanence recyclés ou transformés. C'est souvent dans ces milieux que les espèces végétales et animales présentent les concentrations les plus élevées en substances toxiques.

Par ailleurs, au sein même de ces grandes composantes environnementales, différents facteurs, naturels ou anthropiques spécifiques à l'écosystème considéré, déterminent la réponse de l'environnement à une pollution. Dans un espace agricole, par exemple, le type de culture constitue un facteur de sensibilité important. Le blé et le lait produits sur une surface soumise à une même pollution présenteront des niveaux de contamination très différents. La rémanence de cette contamination dans les cultures successives dépendra également fortement des caractéristiques du sol. Et, de manière générale, toutes les caractéristiques intrinsèques à un écosystème qui influent sur le transfert des polluants, confèrent à un environnement une sensibilité spécifique vis-à-vis d'une pollution. Il en est de même de facteurs anthropiques tels que les pratiques agricoles (utilisation d'engrais, irrigation, période de semis) ou zootechniques (alimentation des animaux, présence à l'extérieur).

Si chaque environnement présente une sensibilité à la pollution qui lui est propre, il est difficile de comparer ces différentes sensibilités : est-il plus pénalisant d'avoir un stock de polluants dans un espace naturel peu anthropisé ou d'avoir une concentration de radionucléides importante dans un cours d'eau utilisé pour l'irrigation ?

L'objectif du projet « Sensibilité radioécologique » est de créer un outil normalisé qui permette de représenter et de comparer sur une même échelle de valeur la sensibilité des différents milieux vis-à-vis d'une pollution radioactive. Il s'agit notamment de permettre une classification des différents environnements sur la base de leurs caractéristiques intrinsèques. Les résultats attendus sont, d'une part un système d'indices permettant d'apprécier de manière globale et opposable la sensibilité d'un environnement, et d'autre part une méthode opérationnelle d'indiciage qui rendent compte de l'influence des multiples caractéristiques d'un environnement, sur sa réponse à une pollution radioactive. Pour des applications concrètes, cet outil pourra prendre la forme de cartes de sensibilité, notamment autour des installations nucléaires. L'ajout de la composante « Risque » à celle de la « Sensibilité » permettra ensuite de déterminer la « Vulnérabilité » d'un environnement.

Le concept de sensibilité peut être étendu à d'autres composantes que la composante environnementale. Ainsi, des paramètres liés à l'activité humaine comme le degré d'autarcie, la densité des infrastructures humaines, la capacité d'intervention, les possibilités d'évacuation, etc ... pourraient aussi faire l'objet de classifications interfaçables avec la classification de la sensibilité radioécologique.

2. ENJEUX

Cette normalisation des caractéristiques de l'environnement vis-à-vis d'une pollution radioactive sera utilisable pour l'évaluation et la gestion des risques pour l'homme et l'environnement, à toutes les étapes de l'exploitation d'une installation nucléaire :

- *Avant la mise en exploitation* : aide au choix du site, contribution à l'étude d'impact (caractérisation de l'état initial, zones vulnérables, protection de l'environnement...), aide dans les choix de stratégie de gestion des effluents ...
- En situation d'*exploitation normale* : optimisation des modes de rejets, stratégie de surveillance, optimisation des prélèvements, représentativité des échantillons, évaluation de la pertinence des indicateurs d'impact radiologique...
- En situation *accidentelle* : plan de prélèvement en fonction de la nature des rejets et de leur mode de dispersion dans l'environnement...
- En situation *post accidentelle* : priorité des interventions, traitement des productions et des sols, surveillance...
- En situation de *fin d'activité / friche* : impact du site en l'état et/ou pendant les chantiers de déconstruction, surveillance de l'environnement, orientation des investigations...

Même si le projet Sensibilité est orienté sur les pollutions radioactives, les résultats obtenus seront exploitables pour des pollutions chimiques. En effet, bien que les radionucléides importants du point de vue de la radioprotection (isotopes radioactifs du Cs, Sr, Co, Ru, Pu...) susceptibles d'être émis par une installation nucléaire, ne correspondent pas le plus souvent aux polluants non-organiques étudiés pour leur toxicité chimique potentielle (As, Ni, Cd, Pb, Hg, Cr, Sb), ils présentent de nombreuses analogies de comportement du point de vue de leurs transferts dans l'environnement. Le développement avancé des outils radioécologiques peut donc profiter au domaine chimique (exemple 1 de l'annexe).

Le choix de traiter simultanément les différents milieux (terrestre, aquatique continental et marin) est l'un des enjeux majeurs du projet (études intégrées). Les potentialités en sont nombreuses : traitement global des flux dans les écosystèmes, possibilité d'établir des bilans complets, calcul de doses collectives incluant l'ensemble des contributions d'une même installation, optimisation des rejets, ...

Le choix de considérer parallèlement les différentes manières d'exprimer la réponse de l'environnement à la pollution (activités massiques, activités totales, flux) offre également de nombreuses possibilités : navigation facile entre l'impact individuel et l'impact collectif, possibilité de vérifier la cohérence entre les rejets et les stocks répartis dans l'environnement ...

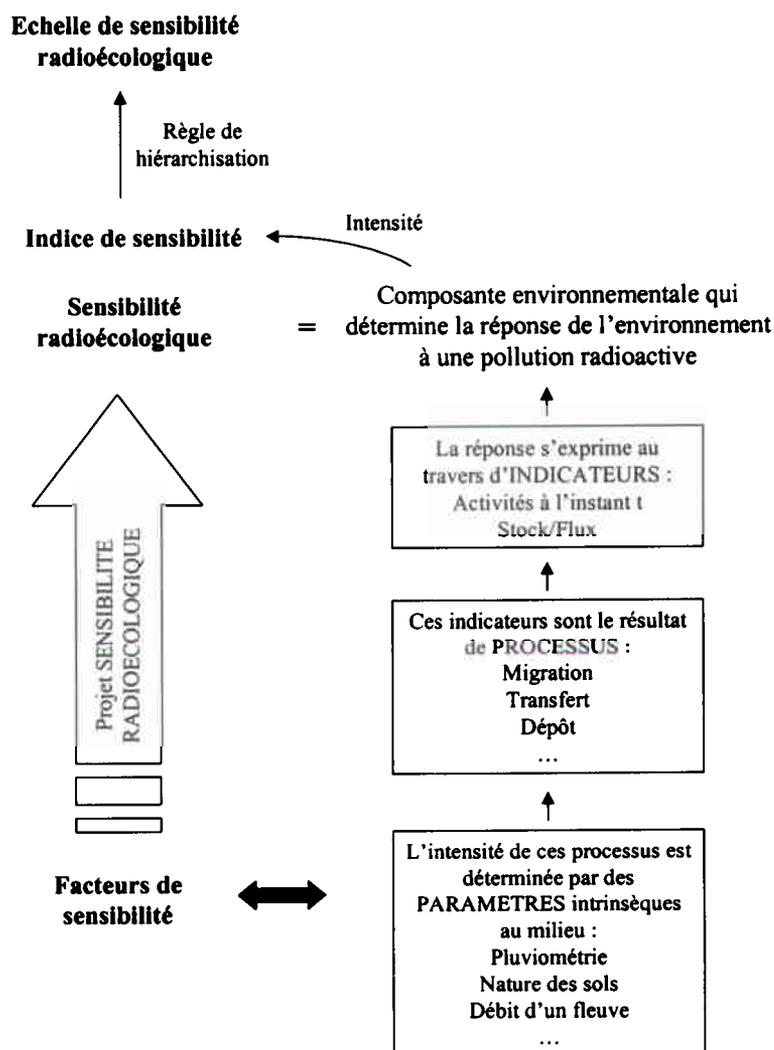
Le concept de sensibilité est fréquemment présenté comme utile pour la gestion post-accidentelle ou la planification préalable à un contexte d'urgence. Dans les contextes d'urgence, l'existence de classifications standardisées et opérationnelles, ainsi que l'existence d'outils de représentation de l'information hiérarchisée sont nécessaires. Dans le domaine nucléaire, l'échelle INES permet une classification des accidents selon leur gravité. Une échelle similaire basée sur des critères de radioprotection a été élaborée récemment [1]. A l'heure actuelle, il n'existe pas d'échelle de classement sur des critères environnementaux. Un effort important est donc attendu en terme de classification afin d'obtenir *in fine* une échelle de sensibilité de l'environnement utilisable pour la gestion post-accidentelle.

3. DEFINITIONS

La **sensibilité radioécologique** peut se définir comme la composante environnementale qui détermine la réponse de l'environnement à une pollution radioactive (Figure 1). Cette réponse s'exprime au travers d'indicateurs : activités massiques ou volumiques, stock ou flux de radionucléides. Pour un rejet déterminé, plus cette réponse sera élevée plus la surface sera sensible. Les indices de sensibilité ont pour objectif d'apprécier globalement l'intensité de réponse d'un environnement à une pollution.

L'intensité des processus de transferts, qui d'un rejet vont conduire à une concentration de polluants dans les milieux physiques et vivants, dépend de différents facteurs ou paramètres intrinsèques aux milieux. Ces facteurs de sensibilité comme le climat, les caractéristiques physico-chimiques, minéralogiques et biologiques des sols, l'usage de ces milieux, etc ... déterminent le comportement des polluants et *in fine* la réponse du milieu.

Figure 1 : Définition de la sensibilité radioécologique



4. ETAT DE L'ART

L'analyse de la bibliographie sera l'objet d'une des premières étapes du projet Sensibilité Radioécologique. Cependant une présentation des concepts liés à la sensibilité est proposée ici afin de replacer le projet sensibilité dans son contexte national et international.

4.1. Forum « Radioecological Sensitivity »

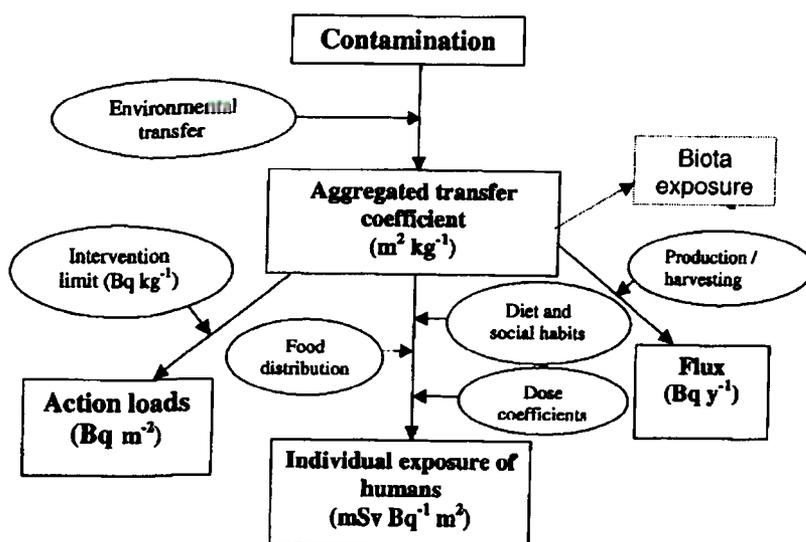
La réflexion théorique la plus approfondie réalisée sur le thème de la sensibilité radioécologique est celle réalisée dans le cadre du Forum « Radioecological Sensitivity » qui a eu lieu entre septembre 1998 et mars 2001 [2]. Ce forum animé par le Center for Ecology and Hydrology a rassemblé des représentants de différents instituts et universités afin de définir la sensibilité radioécologique, de l'illustrer par des exemples d'applications et de proposer des recommandations pour les utilisateurs de ce concept.

Dans le cadre du forum Radioecological Sensitivity, différents indicateurs de sensibilité radioécologique ont été proposés. Il s'agit :

- du facteur de transfert agrégé (Tag) exprimé en Ci.kg^{-1} par mCi.km^{-2} ,
- du niveau d'intervention qui est défini comme le niveau de dépôt (en Bq.m^{-2}) à partir duquel l'intervention (contre-mesure) doit être envisagée car une limite de contamination d'un aliment est dépassée,
- du flux, défini comme la quantité totale de radioactivité produite pour une période de temps donnée (Bq.an^{-1}) qui est transférée d'un compartiment à un autre,
- de l'exposition individuelle (mSv par Bq.m^{-2}).

Les quatre indicateurs de sensibilité présentés dans le cadre du forum Radioecological Sensitivity et les relations qui existent entre eux sont illustrés sur la Figure 2 issue de [2].

Figure 2 : Les indicateurs de sensibilité proposés lors du forum Radioecological Sensitivity

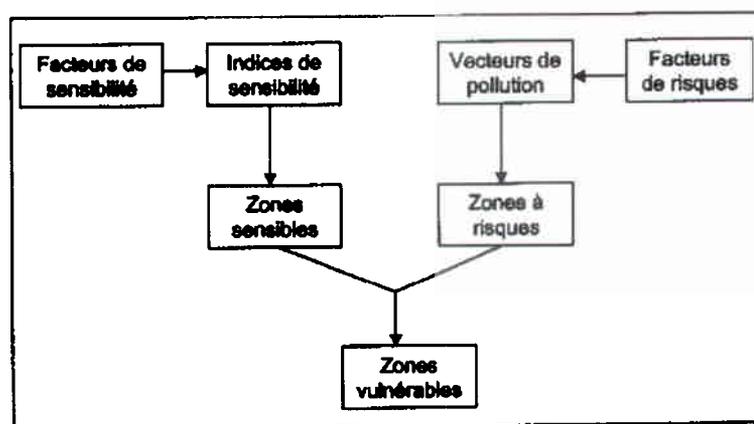


4.2. Exemples d'utilisation des concepts de sensibilité et de vulnérabilité

Outre l'analyse bibliographique et la réflexion sur la sensibilité radioécologique menées dans le cadre du forum Radioecological Sensitivity, des études ponctuelles d'utilisation des concepts de sensibilité et/ou de vulnérabilité sont disponibles dans la littérature du domaine nucléaire et d'autres domaines. Quelques exemples non exhaustifs tirés de domaines non nucléaires sont cités ici pour élargir l'illustration des concepts définis précédemment.

Dans une approche méthodologique pour l'élaboration d'un atlas de sensibilité aux pollutions marines accidentelles, IFREMER situe la « Sensibilité » comme un élément intrinsèque au milieu qui, combiné au « Risque », conduit à déterminer la « Vulnérabilité » (Figure 3).

Figure 3 : Articulation entre vulnérabilité et sensibilité selon l'IFREMER



Le projet américain Wyoming Ground Water Vulnerability Mapping, développé par l'état du Wyoming, a pour objectif de proposer un outil de gestion de la ressource en eau qui tienne compte de la vulnérabilité des aquifères [3]. Dans ce projet, deux étapes sont distinguées. La première étape a pour but d'évaluer la sensibilité des aquifères ; la sensibilité d'un aquifère étant alors définie comme la faculté de laisser passer les polluants de la surface vers les nappes. Dans cette étape, les caractéristiques des sols et les processus géologiques sont étudiés. La deuxième étape a pour but d'évaluer la vulnérabilité des nappes c'est-à-dire de combiner la connaissance sur la sensibilité, issue de la première étape, avec l'évaluation du potentiel pour un polluant d'être épandu à la surface (analyse de l'usage des surfaces par les populations, notamment en ce qui concerne l'épandage de pesticides). On retrouve dans cette approche la même distinction entre vulnérabilité et sensibilité que dans l'approche de l'IFREMER.

Pour anticiper la gestion de situations accidentelles, l'université de Lund en Suède a mené une réflexion sur la vulnérabilité des municipalités en cas d'accident majeur [4]. Dans ce cadre, le risque est considéré en fonction de la probabilité qu'un événement indésirable survienne et en fonction des conséquences de celui-ci. La vulnérabilité est alors définie comme le résultat combiné du facteur risque et de la capacité de la société (en l'occurrence la communauté municipale) à gérer et à survivre en situation d'urgence.

Si les concepts de vulnérabilité et de sensibilité semblent bien distingués dans la théorie, dans la pratique, l'utilisation finale des résultats des études repose fréquemment sur la combinaison des deux concepts. Il semble difficile de se cloisonner a priori dans l'un ou l'autre des concepts. Même si le projet Sensibilité Radioécologique est résolument orienté

sur l'étude de la sensibilité des écosystèmes, l'aspect vulnérabilité sera probablement abordé au cours du projet.

Enfin, dans de nombreuses études utilisant le concept de sensibilité radioécologique, les résultats sont présentés sous forme cartographique. Les SIG apparaissent comme fortement liés à l'utilisation de ce concept car ils permettent de bien rendre compte de la variabilité spatiale de la sensibilité de l'environnement.

5. METHODOLOGIE PROPOSEE

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.

Préalablement à l'étude de ces facteurs, il sera nécessaire de définir les indicateurs de la sensibilité qui seront utilisés pour ce projet (exemple 2 de l'annexe). Il s'agira de choisir ceux pertinents parmi les indicateurs de sensibilité répertoriés dans la littérature (facteur de transfert agrégé, charge critique, niveau d'intervention, flux de radionucléides, exposition individuelle) ou d'en définir d'autres. De même, les échelles de travail en terme de temps et d'espace devront être définies. En ce qui concerne le temps, le projet envisage de traiter le domaine des risques chroniques (exemple 2 de l'annexe) et celui des risques accidentels (exemple 3 de l'annexe). En ce qui concerne l'espace, il est probable que différentes échelles seront exploitées au cours du projet (« zones ateliers », bassins versants, découpages administratifs, ...). Le choix des échelles pertinentes se fera au cours de l'avancement du projet et nécessitera un travail d'harmonisation des résultats issus des différentes études supports du projet.

Il s'agira ensuite de lister les facteurs de sensibilité. Différents types de facteurs seront identifiés et classés : 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 seront déterminées (exemple 4 de l'annexe). 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 sera effectué en s'appuyant d'une part sur des connaissances acquises au sein du LERCM tant en termes de jugements d'expert, qu'en termes de données recueillies sur le terrain (exploitation de la base de données SYLVESTRE 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. Le projet Sensibilité Radioécologique prévoit en effet des liens forts avec les différentes études de terrain du LERCM afin de bénéficier des données les plus récentes et afin de valoriser de façon globale l'ensemble des résultats des études de terrain effectuées au sein du laboratoire.

Pour chaque facteur de sensibilité, un indice, de 1 à 10 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'indication pourra être différent en fonction des enjeux. L'étape de fixation des indices sera une étape

déterminante du succès du projet et sa réussite reposera sur le réseau de compétences d'experts établi pour le projet.

Parallèlement, la contribution ou « poids » relatif de chaque facteur dans la sensibilité du milieu étudié, sera déterminé 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 sera effectué principalement en utilisant des modèles de transferts des polluants dans les différents milieux.

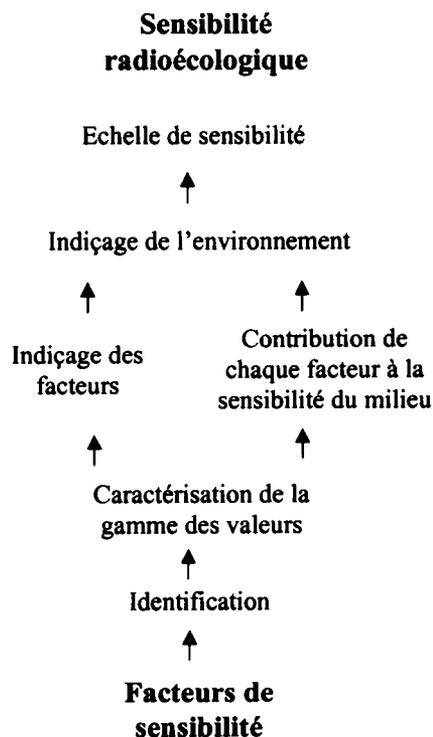
La sensibilité de l'environnement sera alors déterminée par la somme des indices de chaque facteur pondéré par sa contribution. Le chiffre ainsi obtenu permettra de comparer entre-eux les milieux du point de vue de leur sensibilité. Plus le nombre obtenu sera élevé plus la sensibilité de l'environnement sera importante.

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

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

La figure 4 présente les principales étapes du projet Sensibilité Radioécologique.

Figure 4 : Les principales étapes du projet Sensibilité Radioécologique



6. CONCLUSION

La sensibilité radioécologique est un concept qui permet de représenter l'intensité de la réponse de l'environnement à une pollution. Le projet Sensibilité Radioécologique proposé par le LERCM a pour objectif de rendre opérationnel ce concept en explicitant les relations entre les paramètres intrinsèques et les indices de sensibilité des milieux et en construisant les outils permettant de représenter et de hiérarchiser ces indices. Ce projet doit permettre de fournir une classification de l'environnement utilisable dans le cadre de l'évaluation et la gestion des risques pour l'homme et pour l'environnement.

La fiche projet en cours d'élaboration précise les moyens et les échéances du projet : équipe, plan de travail et jalons, budget, documents à produire.

7. LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : DEFINITION DE LA SENSIBILITE RADIOECOLOGIQUE	6
FIGURE 2 : LES INDICATEURS DE SENSIBILITE PROPOSES LORS DU FORUM RADIOECOLOGICAL SENSITIVITY	7
FIGURE 3 : ARTICULATION ENTRE VULNERABILITE ET SENSIBILITE SELON L'IFREMER	8
FIGURE 4 : LES PRINCIPALES ETAPES DU PROJET SENSIBILITE RADIOECOLOGIQUE	10

8. BIBLIOGRAPHIE

1. P. Crouaïl et C. Lefaure, Proposition d'une échelle de classement des incidents et accidents radiologiques, Rapport n°276, Centre d'études sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire, 2003
2. B.J. Howard et al, Radioecological Sensitivity Final Report : September 1998-March 2001, Center for Ecology & Hydrology, Natural Environment Research Council, March 2002
3. Hamerlinck and Arneson, Wyoming groundwater vulnerability assessment handbook, SDVC Reprt 98-01, 1998
4. J. Nilsson, S.E. Magnusson, P.O. Hallin, B. Lenntorp, Vulnerability analysis and auditing of municipalities, Lund University, Suède, 2001
5. R. Kendall R, C. Peterson, An empirical model for estimating world-wide deposition from atmospheric nuclear detonations. *Health Phys* 18:357-378; 1970

6. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report of the General Assembly. New York. United Nation Publication. 1982
7. B.G. Bennett, Worldwide dispersion and deposition of radionuclides produced in atmospheric tests. *Health Phys* 41:644-655; 2002
8. M. DeBortoli, P. Gaglione P, Variability of washout ratio for some fallout radionuclides. In: Physical behavior of radioactive contaminants in the atmosphere. Proceeding of an International Atomic Energy Agency symposium. Vienna. 1974
9. M. Peckar, Regional models LPMOD and ASIMD algorithms, parameterization and results of application to Pb and Cd in Europe scale. Co-operative Program for Monitoring and evaluation of the long range transmission of air-pollutants in Europe. EMEP/MSC-E Report 9/96. 1996
10. R. Chester, M. Nimmo, P.A. Corcoran, Rainwater-aerosol trace metal relationship at Cap-Ferrat: a coastal site in the western Mediterranean. *Marine Chemistry* 58:293-312; 1997
11. P. Renaud P, D. Louvat, Magnitude of fission products depositions from atmospheric nuclear tests fallout in France. Submitted to *Health Phys*
12. L. Pourcelot, D. Louvat, F. Gauthier-Lafaye, P. Stille, Mechanism of formation of enriched areas soils radioactivity in mountain soils. *J.Environmental radioactivity*, In Press
13. P.H. Bourrelier et J. Berthelin, Contamination des sols par des elements traces : les risques et leur gestion. Rapport n°42 de l'Académie des Sciences. Tec et Doc Lavoisier ed. 1998
14. M. Steinman and P. Still, Rare earth element behavior and Pb, Sr, Nd isotope systematics in a heavy metal contaminated soil. *Applied Geochemistry*, vol 12, pp 607-623. 1997
15. K. Beaugelin, Adaptation du modèle de transfert GT3-GRNC dans un écosystème agricole aux polluants inorganiques non radioactifs. Rapport IPSN/SERLAB 01-39. 2001
16. Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, Evaluation des risques pour la santé humaine des rejets chimiques des installations nucléaires du Nord-Cotentin. 2002
17. P. Renaud, H. Maubert, Agricultural counter-measures in the management of a post-accidental situation, *J. Environmental Radioactivity*, vol. 35, n° 1, pp. 53-69, 1997
18. Atomic Energy International Agency. Present and future environmental impact of the Chernobyl accident. Study monitored by an International Advisory Committee under the project management of the Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN), France. IAEA TecDoc – 1240. Vienna 2001
19. P. Renaud, H. Maubert, C. Badie, Contamination des productions agricoles de base suite à une émission atmosphérique accidentelle – les modèles de transferts des radionucléides dans la chaine alimentaire terrestre, Document SERE 94-046, juillet 1994
20. A.F. Nisbet, R.F.M. Woodman and R.G.E Haylock, Recommended soil-to-plant transfer factors for radiocesium and radiostrontium for use in arable systems, NRPB-R304, National Radiological Protection Board, Chilton, Didcot, 1999

ANNEXE : EXEMPLES

Les exemples proposés dans ce rapport ont pour objectif d'illustrer sur des cas théoriques simples les premières orientations envisagées pour le projet Sensibilité Radioécologique, les premiers éléments méthodologiques et certains des résultats attendus.

1. Exemple d'analogies entre polluants chimiques et radioactifs

Les principaux paramètres intervenants dans les modèles de dispersion atmosphérique d'aérosols sont des paramètres physiques indépendants du composé chimique fixé sur les aérosols [5,6,7]. Il en est de même des processus de chargement des gouttes d'eau en aérosols, par emprisonnement lors de leur formation puis par interception lors de leur chute. Ces processus essentiellement physiques conduisent à un rapport assez constant entre la concentration du polluant dans l'eau de pluie et dans l'air traversé (washout ratio) quel que soit l'élément chimique considéré ([8] pour Zr, Ru, Pu, Cs, Sr ; [9] pour Cd et Pb ; [10] pour Cu, Ni, Co, Al ; [11] pour Zr, Cs, Ru, Ce, Sr). Même dans le cas particulier des dépôts neigeux, une étude menée par l'IRSN a montré que les processus qui ont conduit en mai 1986 à la formation de tâches de re-concentration du Cs dans les sols d'altitude, répétés sur plusieurs années, ont également conduit à concentrer aux mêmes endroits le Pu des retombées des tirs d'armes nucléaires et de nombreux autres polluants atmosphériques dont Pb, Cd et Sb [12].

Dans les sols, la nature chimique des polluants s'exprime de manière très caractéristique. Toutefois, les facteurs considérés comme déterminants vis-à-vis de la capacité de rétention ou de remobilisation des éléments traces sont globalement les mêmes : granulométrie, caractéristiques argilo-humiques [13,14].

Dans le cadre des travaux du Groupe Chimique Nord-Cotentin (GNRC-Chimique), l'étude comparative des valeurs des principaux facteurs de transferts dans la chaîne alimentaire, préconisées pour des polluants chimiques non organiques (As, Pb, Cd, Hg, Ni) et radioactifs [15] a montré que pour les facteurs de transfert des feuilles vers les parties consommables, du sol vers les plantes, des fourrages aux produits animaux et pour ceux liés aux transformations agroalimentaires, il existe un large recouvrement entre les valeurs proposées. Ainsi, c'est un modèle radioécologique qui a été choisi par l'INERIS et l'IRSN pour évaluer les conséquences environnementales des éléments chimiques non organiques rejetés par les industries du Nord Cotentin [16].

En ce qui concerne les pratiques agricoles et d'élevage, la plupart des facteurs susceptibles d'affecter les transferts ou plus directement les indices de sensibilité, devraient jouer de la même manière pour la plupart des produits non-organiques : c'est le cas des rendements de biomasse foliaires, des rendements agricoles, des pratiques d'irrigation, des pratiques zootechniques. L'existence d'analogies entre des radionucléides et des éléments majeurs sont par ailleurs utilisés pour réduire le transfert des éléments radioactifs du sol vers les plantes sur les surfaces les plus touchées par l'accident de Tchernobyl (Cs/K, Sr/Ca) [17,18].

2. Exemple dans le cas d'une installation en fonctionnement normal

L'exemple considère une installation nucléaire devant rejeter sur une année une activité donnée d'un radionucléide. Cette installation peut répartir ces rejets selon deux modes : par voie atmosphérique ou par voie liquide dans un cours d'eau voisin. Les voies de transfert dans l'environnement considérées sont le dépôt sur le sol et le transfert à une culture végétale pour la voie atmosphérique et le transfert par irrigation pour la voie

liquide. Le collecteur final considéré pour le radionucléide est le végétal cultivé. Les calculs sont faits pour une année de rejet en supposant un état initial non contaminé.

L'étude de différents facteurs de sensibilité est proposée ici : la taille de la zone d'étude, les pratiques culturales (la variété cultivée, le type de culture et l'irrigation), la répartition liquide/gaz et le débit du cours d'eau. Dans cet exemple, les valeurs utilisées pour les paramètres sont issues de la littérature. Pour le projet Sensibilité, la caractérisation des valeurs des paramètres sera basée principalement sur l'analyse des données acquises par les études de terrain du LERCM.

On considère une répartition des rejets pour moitié dans l'atmosphère et pour moitié dans le cours d'eau. Le cours d'eau considéré a un fort débit moyen (Type Rhône). Le sol est de type limoneux, la culture considérée est la salade pour l'ensemble du territoire. Deux zones d'étude sont considérées : une zone dite « zone proche » dans un rayon de 2 km autour de l'installation et une zone dite « canton » dans un rayon de 15 km autour de l'installation.

Les indicateurs de sensibilité calculés sont : l'activité moyenne annuelle et la quantité de Bq.

Influence de la taille de la zone d'étude sur le choix de l'indicateur

Le dépôt atmosphérique le plus important a lieu dans la zone proche (l'activité surfacique déposée du fait de l'irrigation est considéré comme identique pour les deux zones) et les activités du sol et des salades de la zone proche sont environ 20 fois plus fortes que pour le canton. Si l'on considère maintenant les quantités totales de becquerels, le rapport est inversé ; le canton produit environ 3 fois plus de « becquerels.salades » que la zone proche.

De manière générale, pour un même scénario de calcul, l'information sera orientée de façon différente si l'on considère l'indicateur « activité » ou l'indicateur « quantité de becquerels ». L'indicateur « activité » met l'accent sur la zone proche où l'on retrouve les activités les plus importantes dans le sol et les salades, alors que l'indicateur « quantité de becquerels » met plutôt l'accent sur le canton et même sur l'extérieur du canton car la fraction de radionucléides qui reste sur la zone étudiée est relativement faible, environ $\frac{1}{4}$ des radionucléides émis pour le cas étudié.

La relation entre la taille de la zone contaminée étudiée et l'indicateur de sensibilité sera étudiée dans le cadre du projet Sensibilité Radioécologique.

Influence des pratiques culturales sur l'indicateur

Dans le cas de la zone proche, si l'on considère deux variétés différentes de salade : la première variété poussant rapidement et permettant de faire plusieurs récoltes d'affilée ; la deuxième variété poussant plus lentement et produisant donc une seule culture sur l'année. L'activité de la première salade est alors environ 5 fois plus faible que celle de la seconde car elle aura reçu moins de dépôt. Si l'on considère le critère de l'activité moyenne, la première variété de salade est préférée. Cependant en terme de quantité, dans les deux cas, la quantité de Bq « produite » sur l'année est la même. La variété de la salade est donc un facteur de sensibilité pour l'activité moyenne mais pas pour la quantité de becquerel exportée. De façon plus général, le projet Sensibilité permettra de classer les facteurs de sensibilité (ici l'exemple de la variété de la salade) en fonction de leur pertinence selon l'indicateur de sensibilité considéré.

Si l'on remplace la culture de salade par une culture de pomme de terre, l'absence de translocation diminue considérablement les transferts vers la culture. La quantité de

becquerels exportée par la culture est alors très faible, que ce soit pour le canton ou pour la zone proche. La quantité de becquerel restant dans les sols et disponible pour les cultures suivantes correspond alors à quasiment tous les dépôts de l'année (dépôt atmosphérique + dépôt par l'irrigation).

Influence du mode de rejet et du type de cours d'eau sur l'importance des pratiques culturales

Si l'on s'intéresse à la source de becquerel, que ce soit dans la zone proche ou dans le canton, les becquerels des salades proviennent en majorité des rejets atmosphériques. Si l'on fait varier la répartition entre les rejets liquides et atmosphériques, dans le cas du Rhône, il faudrait que les rejets liquides représentent 99,5% de l'activité rejetée pour que l'irrigation ait la même importance dans la contamination des salades que le dépôt atmosphérique. Même si le cours d'eau n'est plus le Rhône mais un cours d'eau de débit plus faible, dans le cas de la zone proche, ce sont toujours en majorité les becquerels atmosphériques qui sont retrouvés dans les salades alors que pour le canton la répartition 50% atmosphérique et 50% cours d'eau est retrouvée dans les salades. L'irrigation peut donc avoir un effet variable dans la contamination des salades selon la zone et selon le type de cours d'eau considéré. Le projet Sensibilité permettra, par exemple, de montrer quelles sont les pratiques culturales (ici l'exemple de l'irrigation) qui peuvent être importantes dans la contamination des végétaux et dans quelles configurations de rejets ces pratiques sont réellement importantes.

3. Exemple dans le cas d'une surface cultivée contaminée par un dépôt accidentel

Cet exemple considère un champ d'1 hectare sur lequel est appliqué une rotation des cultures de type triennale : colza d'hiver / blé d'hiver / blé d'hiver. Ce champ est supposé contaminé par une pollution radioactive atmosphérique de césium 137 pour laquelle on fait varier la date du dépôt (1^{er} janvier, 1^{er} mars, 1^{er} juin et 1^{er} septembre). De même, on fait varier la culture présente l'année du dépôt.

Le code de calcul utilisé pour cet exemple est le code ASTRAL [19]. L'indicateur de sensibilité calculé est l'activité totale récoltée sur ce champ en 3 ans.

Les calculs réalisés montrent que pour les dates de dépôt de janvier à juin, le cas le plus pénalisant en terme d'activité totale récoltée sur 3 ans survient quand on cultive du blé d'hiver. Un champ de blé est donc plus sensible à un dépôt de césium 137 entre janvier et juin qu'un champ de colza. Par contre, pour un dépôt le 1^{er} septembre, l'activité totale récoltée est plus importante si la culture est du colza d'hiver. La sensibilité au type de culture peut donc être inversée au cours de l'année.

Enfin, quelque soit le stade de la rotation culturale, les calculs réalisés montrent que la date de dépôt la plus pénalisante est le 1^{er} juin. La sensibilité à la date de dépôt est donc plus importante que la sensibilité au type de culture.

4. Exemple de caractérisation d'un facteur de sensibilité à partir de données de terrain

Sans préjuger des enseignements du projet Sensibilité Radioécologique, le type de sol sera certainement un facteur de sensibilité important des milieux. L'objectif de cet exemple est de montrer comment les données de la base de données SYLVESTRE

peuvent apporter des informations pour caractériser la gamme des valeurs de ce paramètre.

Si l'on s'intéresse à différents sites industriels (par exemple le cas du CNPE de Tricastin et du CNPE de Gravelines), une centaine d'échantillons de sol sont disponibles dans SYLVESTRE avec leurs caractéristiques granulométriques : % de sable, % de limon, % d'argile et % de matière organique.

Le calcul des valeurs moyennes de ces pourcentages conduit à des résultats représentatifs d'un sol de type limoneux (moins de 70% de sable, moins de 35% d'argile, moins de 20% de matière organique) pour chacun des deux sites. Les transferts sol/plante sont alors représentés par un facteur de transfert qui dépend du végétal considéré et du type de sol. Par exemple, pour le ^{137}Cs le facteur de transfert aux pommes de terre pour un sol limoneux est en moyenne de $0,03 \text{ Bq.kg}^{-1}\text{sec}$ de végétal par $\text{Bq.kg}^{-1}\text{sec}$ de sol avec des valeurs basses et hautes, inférieures ou supérieures d'un facteur 10 [20]. Pour le ^{90}Sr , il est de 0,2 (0,05-0,86) $\text{Bq.kg}^{-1}\text{sec}$ de végétal par $\text{Bq.kg}^{-1}\text{sec}$ de sol.

Si l'on s'intéresse maintenant de plus près aux caractéristiques des sols voisins du site de Tricastin, il apparaît qu'en fait 40% des sols de SYLVESTRE sont des sols sableux (>70% de sables). Or pour les sols sableux, le facteur de transfert moyen du césium aux pommes de terre est près de 4 fois plus important que pour les sols limoneux. Pour le site de Gravelines, plus de 20% des sols sont des sols organiques (>20% de matière organique) pour lesquels le facteur de transfert moyen pour le ^{90}Sr dans les pommes de terre est 10 fois plus faible que pour les sols limoneux.

La variabilité des types de sol peut donc influencer de façon importante sur le facteur de transfert sol/plante et donc sur la sensibilité du sol à la voie de contamination racinaire.

L'analyse des données de SYLVESTRE apportera des informations pour caractériser la diversité des sols français et étudier l'influence de cette diversité sur les facteurs de transfert des radionucléides dans l'environnement.

Bilan des exemples

Les exemples présentés dans ce rapport correspondent à des situations simplifiées qui permettent d'illustrer certains des résultats attendus du projet Sensibilité Radioécologique et la méthode pour y arriver mais ne préjugent pas des choix définitifs de simplifications. D'autres périodes de temps, d'autres échelles d'espace, d'autres radionucléides, d'autres types de sols, d'autres types de culture, d'autres type de cours d'eau ... seront étudiés dans le cadre du projet. De plus, de nombreux développements sont envisagés et notamment la connexion au milieu marin, la prise en compte des décroissances et de la migration dans le sol, la prise en compte des niveaux de radioactivité préexistants dans l'environnement et d'autres voies de transfert (animaux, inondation, érosion,...).

Une des grandes orientations du projet qui transparait du deuxième exemple traité est le choix de considérer globalement l'environnement et de ne pas cloisonner les milieux terrestres et aquatiques.