

**Projet Sensibilité Radioécologique
(SENSIB)**

**Bilan de l'utilisation opérationnelle du
concept de sensibilité de l'environnement**

C. MERCAT-ROMMENS & P. RENAUD

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

Rapport DEI/SESURE n° 2004-12

Juillet 2004

IRSN INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE
 DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'INTERVENTION
 SERVICE D'ETUDE ET DE SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITE DANS L'ENVIRONNEMENT

BP 35, 78116 LE VESINET CEDEX, France - Télécopie : 01.30.15.37.78 - Téléphone : 01.30.15.52.42

Demandeur	
Référence de la demande	
Numéro de la fiche programme	

**Projet Sensibilité Radioécologique (SENSIB) : bilan de l'utilisation
opérationnelle du concept de sensibilité de l'environnement**

Laboratoire d'Etudes Radioécologiques du milieu Continental et Marin

Rapport DEI/SESURE n° 2004-12

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur *	Chef du SESURE	Directeur de la DEI	Directeur Général de IRSN
Noms	C. MERCAT	P. RENAUD	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	08/07/04	09/07/04	11/08/2004	27/08/04	
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

RESUME

Ce rapport du projet Sensibilité Radioécologique (SENSIB) présente une revue de l'état de l'art concernant la signification et les utilisations actuelles et passées du concept de sensibilité de l'environnement, tant sur le plan national qu'international. A partir d'exemples choisis, des enseignements sont tirés pour la mise en place et la réalisation du projet SENSIB.

ABSTRACT

This report of the project Radioecological Sensitivity (SENSIB) presents a review of the state of the art concerning the significance and the uses, current and last, of the concept of sensitivity of the environment, as well on the national level as international. From examples chosen, lesson is drawn for the design and the management of the project SENSIB.

MOTS-CLES

Sensibilité de l'environnement, pollutions, classification du territoire, gestion des risques

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	4
2. RAPPEL SUR LE PROJET SENSIBILITE	4
3. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
3.1. Forum « Radioecological Sensitivity ».....	5
3.2. Etude de la méthodologie Sites pollués	8
3.2.1. Volet chimique.....	8
3.2.2. Volet radiologique.....	11
3.3. Etude de la vulnérabilité des nappes autour des sites nucléaires.....	13
3.4. Classification des zones vulnérables vis à vis des nitrates	14
3.5. Classification des bassins versants en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires.....	15
3.6. Méthodologie de gestion des zones côtières de l'IFREMER.....	16
3.7. Autres exemples.....	20
4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LE PROJET SENSIB.....	21
5. BIBLIOGRAPHIE	25
6. LISTE DES FIGURES	27

1. INTRODUCTION

Ce rapport d'étape du projet Sensibilité Radioécologique, SENSIB, (Mercat-Rommens et Renaud 2003) a pour objectif de faire une revue de l'état de l'art concernant la signification et les utilisations actuelles et passées du concept de sensibilité de l'environnement. A partir des enseignements de l'analyse bibliographique, des axes de travail seront proposés pour les trois ans à venir pour le Service d'Etude et de Surveillance de la Radioactivité dans l'Environnement, et notamment pour le laboratoire porteur du projet (le Laboratoire d'Etudes Radioécologiques en Milieu Continental et Marin).

Ce travail a bénéficié d'un soutien financier de l'ADEME, organisme intéressé par l'approche proposée dans le projet SENSIB et qui envisage à terme une déclinaison à la problématique des pollutions chimiques dans le contexte spécifique des friches industrielles.

2. RAPPEL SUR LE PROJET SENSIBILITE

La sensibilité radioécologique peut se définir comme l'ensemble des caractéristiques de l'environnement qui déterminent la nature et l'intensité de la réponse de celui-ci lorsqu'il est soumis 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 le milieu 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 et de concentration, qui d'un rejet vont conduire à une distribution 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.

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 » (SENSIB) 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'indigage 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.

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 ... peuvent aussi faire l'objet de classifications interfaçables avec la classification de la sensibilité radioécologique.

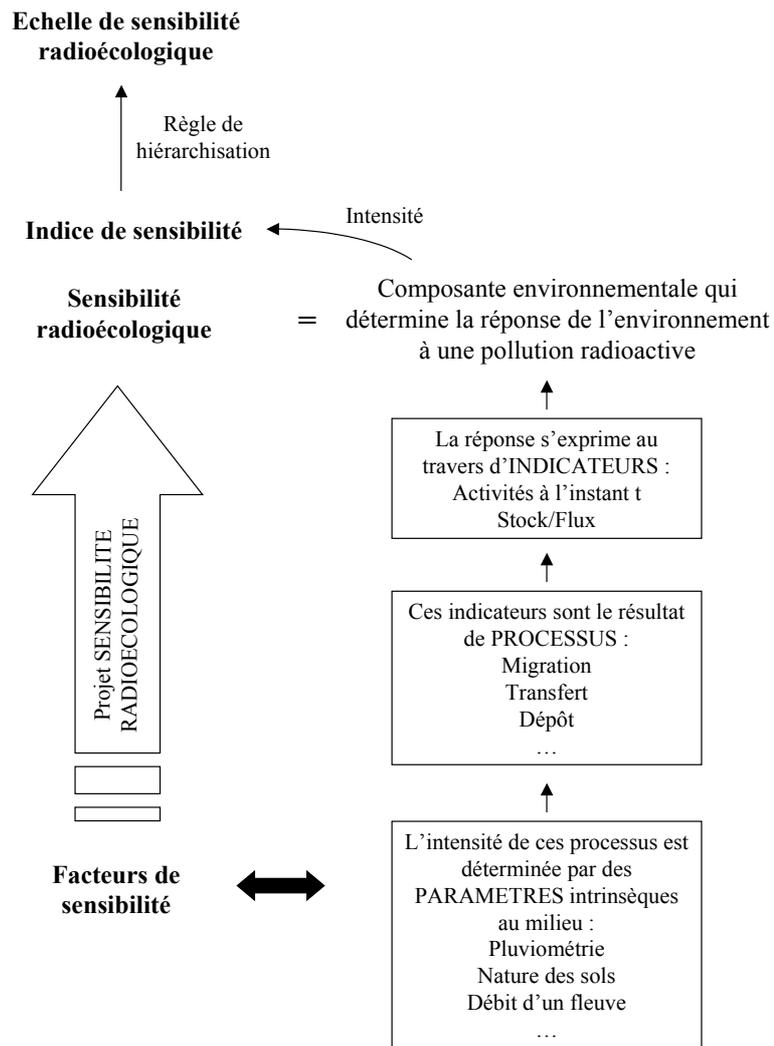


Figure 1 : Définition de la sensibilité radioécologique

La multiplicité des enjeux associés au concept de Sensibilité nécessite une gradation des objectifs du projet SENSIB. Dans un premier temps, le projet s'attachera plus particulièrement à la cible humaine car l'adaptation du projet à la protection de l'environnement nécessite des préalables d'acquisition de connaissances dans le cadre d'autres projets en cours au sein de l'IRSN. De même dans une première étape, le projet se concentrera sur l'obtention de résultats opérationnels dans les domaines suivants : la gestion post-accidentelle, l'adaptation de la méthodologie d'étude d'impact dosimétrique, l'évaluation des stratégies de surveillance de l'environnement, la gestion des sites pollués.

3. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

3.1. Forum « Radioecological Sensitivity »

La réflexion théorique la plus approfondie 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 (Howard *et al.* 2002). 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.

Préalablement à l'émergence du terme de sensibilité radioécologique, l'approche proposée par la CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique) et utilisée dans le domaine de la radioprotection pour identifier les potentiels de forte exposition est la recherche des groupes critiques (aujourd'hui appelés « groupes de référence »). Les groupes critiques sont définis comme les représentants du public qui sont le plus exposés à une source (ICRP 1993). La recherche des groupes critiques implique la prise en compte des habitudes de vie de la population et aussi la prise en compte de l'environnement.

Le concept de sensibilité radioécologique est apparu pour la première fois en 1979 dans le cadre de l'étude des conséquences des retombées des essais nucléaires atmosphériques (Aarkrog 1979). La sensibilité radioécologique était définie comme « la concentration d'un radionucléide dans un échantillon de l'environnement résultant d'un dépôt de 1 mCi.km^{-2} de ce radionucléide ». L'indicateur de mesure de la sensibilité radioécologique utilisé par Aarkrog était alors un facteur de transfert agrégé (Tag) exprimé en Ci.kg^{-1} par mCi.km^{-2} .

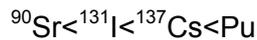
En 1999, le concept de vulnérabilité fut utilisé dans le cadre du projet AMAP - Arctic Monitoring and Assessment Programme – (Strand *et al.* 1997). Le groupe de travail montrait notamment que les écosystèmes arctiques étaient plus vulnérables à la contamination au radiocésium que les écosystèmes des climats tempérés et identifiait les facteurs à l'origine de cette vulnérabilité. Le travail sur la vulnérabilité des écosystèmes arctiques a ensuite été poursuivi jusqu'en 2002 dans le cadre du programme AVAIL - Arctic Vulnerability to radioactive Contamination – (AVAIL 2002).

Le concept de « critical loads » (charge critique), développé initialement pour représenter l'impact des émissions acides, fut proposé comme indicateur de la sensibilité radioécologique. La charge critique est définie comme « l'estimation du niveau d'exposition à un ou plusieurs polluants en dessous duquel, dans l'état actuel des connaissances, aucun effet délétère significatif sur l'environnement n'est susceptible de survenir ». Le concept de charge critique a été largement utilisé par la suite : en Hongrie pour évaluer le transfert du césium 137 dans les produits alimentaires après un dépôt accidentel (Wright *et al.* 1998), en Suède pour comparer le comportement de différents radionucléides dans le sol dans différentes régions agricoles (Eriksson 1997) et dans le cadre des projets SAVE - Spatial Analysis of Vulnerable Ecosystems - (Howard *et al.* 1999) et ARMARA (Iosjpe *et al.* 2002). Au cours du projet SAVE, les charges critiques pour le césium 137 par rapport au lait de vache ont été estimées pour toute l'Europe Occidentale (Wright *et al.* 1998). Les caractéristiques environnementales et notamment les types de sol sont apparus comme les facteurs les plus pertinents pour classer les territoires. La même approche a été retenue dans le projet ARMARA pour élaborer le modèle d'impact de la radioactivité dans l'Atlantique Nord et dans les mers arctiques. Dans ce modèle, le découpage spatial des océans est basé sur les caractéristiques physiques des masses d'eau.

Dans le cadre du forum Radioecological Sensitivity, le deuxième indicateur de sensibilité radioécologique proposé (après le facteur de transfert agrégé d'Aarkrog) est dérivé du concept de charge critique. Il s'agit de l' « Action load » (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.

Pour illustrer ce concept, dans le cadre du forum Radioecological Sensitivity, des niveaux d'intervention pour le milieu terrestre ont été calculés en utilisant trois modèles de transfert de radioactivité dans l'environnement : ECOSYS, AGROLAND et SAVE-IT (Howard *et al.* 1999). Différents radionucléides ont été étudiés : ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I et les isotopes du plutonium. Le produit final considéré était le lait de vache. L'origine de la contamination était un dépôt sec ou humide, à différentes dates (1^{er} mai, 1^{er} août, 1^{er} octobre) pour trois types de sol (argileux, sableux, tourbeux). Les résultats montrent des différences selon les modèles, du fait notamment des spécificités géographiques intégrées dans ces modèles développés pour des pays différents. Les résultats

permettent cependant d'illustrer l'intérêt de l'utilisation de ce concept. Ainsi, les hiérarchisations suivantes pour les niveaux d'intervention ont pu être établies :



Pour le ^{137}Cs : sol tourbeux < sol sableux < sol argileux

Pour le ^{90}Sr : sol argileux < sol tourbeux < sol sableux

D'autres exemples ont été traités lors du forum Radioecological Sensitivity pour le milieu aquatique (cas de l'eau potable, cas des poissons pour trois systèmes hydriques différents) et pour le milieu marin (cas d'un dépôt atmosphérique en surface).

Le troisième indicateur de sensibilité proposé dans le cadre du forum est le flux, défini comme la quantité totale de radioactivité produite pour une période de temps donnée ($\text{Bq}\cdot\text{an}^{-1}$) qui est transférée d'un compartiment à un autre. Cet indicateur de sensibilité utile pour évaluer des doses collectives a été utilisé dans plusieurs études tant dans le milieu continental (Camplin *et al.* 1989) que marin (Iosjpe *et al.* 2002).

Le dernier indicateur de sensibilité proposé lors du forum Radioecological Sensitivity représente l'exposition individuelle (mSv par $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$). Le concept est proche de celui du facteur de transfert agrégé proposé par Aarkrog mais intègre en plus les comportements individuels des populations étudiées.

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 (Howard *et al.* 2002).

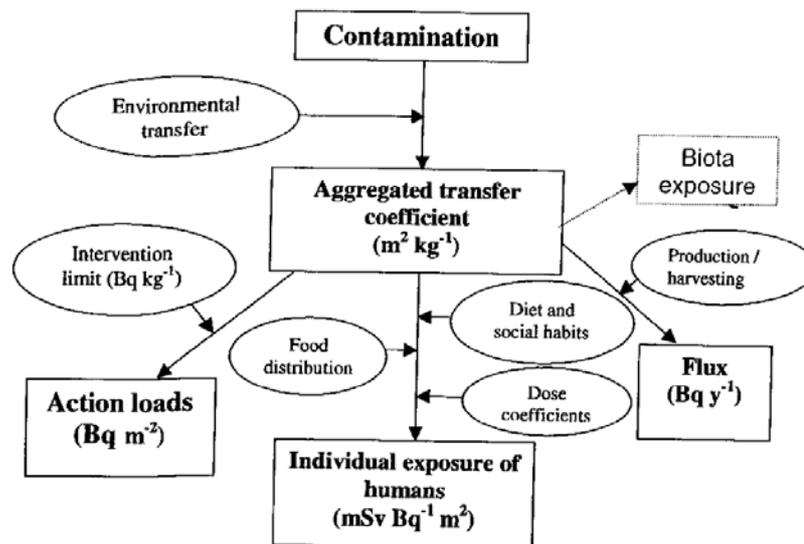


Figure 2 : Les indicateurs de sensibilité proposés lors du forum Radioecological Sensitivity

Bilan pour SENSIB :

Pour le projet Sensibilité Radioécologique, les enseignements de ce forum sont surtout théoriques. Les réflexions sur la signification et les utilisations possibles des indicateurs de sensibilité sont particulièrement intéressantes comme base de travail sur les indicateurs de sensibilité à retenir pour le projet. Par contre, les exemples traités sont toujours spécifiques de certains radionucléides (essentiellement le césium 137) et spécifiques d'un milieu (agricole, marin ou fluvial), ce qui laisse une place pour des projets comme SENSIB dont l'objectif est de traiter l'environnement de façon plus globale.

3.2. Etude de la méthodologie Sites pollués

3.2.1. Volet chimique

La méthode d'évaluation simplifiée des risques pour des sites pollués telle que proposée dans le classeur-guide du BRGM (2000) repose sur la passation d'un questionnaire structuré selon les principes de l'évaluation des risques. L'existence d'un risque implique la présence concomitante d'une source dangereuse, d'un mode de transfert et d'une cible. Dans la méthodologie Sites pollués, chacune de ces trois composantes est caractérisée à partir d'un système de notation basée sur la combinaison de notes représentant la contribution de différents paramètres. 43 paramètres ont été retenus et sont répartis en quatre catégories de facteurs : le potentiel de danger de la source, le potentiel de mobilisation et de transfert des substances polluantes, la cible et l'impact constaté. Chaque facteur fait l'objet de modalités de notation spécifiques, fonction des valeurs qu'il peut prendre. Les notes attribuées à chaque facteur (grille de notation de 0 à 3, avec possibilité de mettre un « ? » en cas de doute) sont ensuite reprises et combinées pour chacune des cibles retenues dans l'évaluation (eaux souterraines, eaux de surface, sol). Un site peut donc par exemple être classé en 1 pour les eaux de surface et 2 pour les sols ou vis-versa. L'évaluation simplifiée des risques correspond finalement au déroulement d'une arborescence qui permet de tenir compte de multiples critères dans l'élaboration de la note finale affectée à un site pollué (Figure 3).

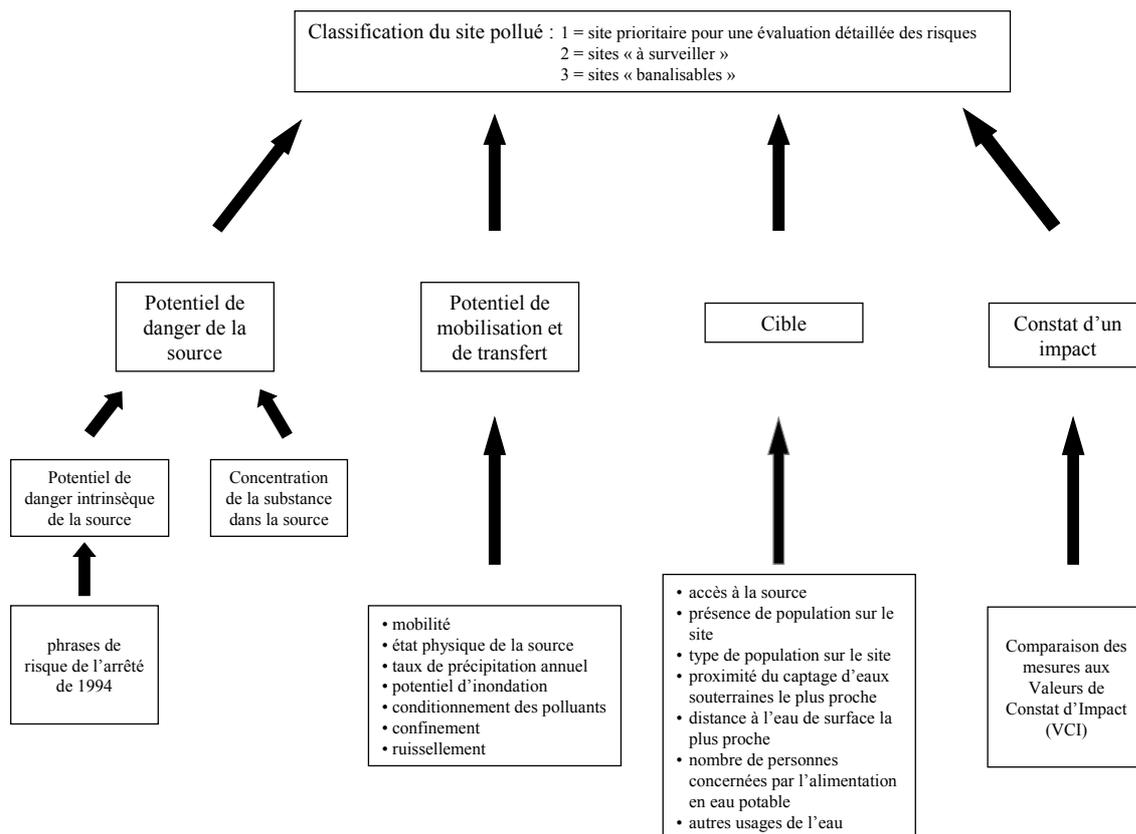


Figure 3 : L'arborescence de la méthodologie Sites Pollués

Potentiel de danger de la source

Dans un premier temps, le potentiel de danger intrinsèque de la substance est établi vis-à-vis de la santé humaine à partir d'une table de correspondance avec les phrases de risque de l'arrêté ministériel du 20 avril 1994 relatif à la déclaration, la classification,

l'emballage et l'étiquetage des substances. Dans cet arrêté figurent 64 types de phrases de risque et 2300 substances et mélanges de substances. A chaque phrase de risque, comme par exemple « provoque des brûlures » (R34), « provoque de graves brûlures » (R35), « irritant pour les yeux », (R36) « risques de lésions oculaires graves » (R41), est associée une note valable pour un milieu d'exposition (eau de surface, eau souterraine et sol) et pour un type de danger correspondant à une voie d'exposition de l'homme (toxicité par inhalation, toxicité par ingestion, toxicité par contact cutané, cancérogénèse, mutagenèse et teratogénèse).

Si des substances identifiées ne sont pas traitées dans l'arrêté, une méthode est proposée pour obtenir une note de potentiel de danger à partir des résultats des études toxicologiques et épidémiologiques disponibles. L'écotoxicité n'est pas prise en considération dans l'évaluation simplifiée des risques des sites pollués, de même que le milieu « air ».

Dans un second temps, le potentiel de danger de la source est établi à partir d'une modulation de la note du potentiel de danger intrinsèque de la substance selon la concentration de la substance dans la source. Si la concentration de la substance n'excède pas un seuil donné, le potentiel de danger intrinsèque de la substance est divisé par 2 pour obtenir le potentiel de danger de la source, sinon la note affectée au potentiel de danger intrinsèque de la substance est conservée pour le potentiel de danger de la source. Enfin, en fonction de la quantité de la source (des valeurs seuils sont proposées en m³, en tonne et en hectare), une note de 1 à 3 est proposée pour multiplication au potentiel de danger de la source lors du calcul de synthèse.

Potentiel de mobilisation et de transfert

Le potentiel de mobilisation des substances tient compte à la fois des caractéristiques propres aux produits ou à la source (volatilité, solubilité, état physique) et de l'existence et de l'intensité des vecteurs de mobilisation (pluies et inondations). La détermination du potentiel de mobilisation de la substance s'apprécie à partir de sept paramètres :

- la mobilité (qui correspond à la solubilité),
- l'état physique de la source (solide, boueux ou liquide),
- le taux de précipitations annuel,
- le potentiel d'inondation (fréquence des crues observée),
- le conditionnement des polluants (en vrac, en conteneurs protégés ou non),
- le confinement (protection mauvaise à bonne avec dispositifs ou non de surveillance de l'efficacité dans le temps),
- pour les eaux superficielles : le ruissellement (fonction du pourcentage de pente).

Le potentiel de transfert dans le milieu vers la cible prend en compte trois facteurs :

- la proximité de la nappe ou la hauteur de la zone non saturée qui correspond à la distance qu'ont à parcourir les substances polluantes avant d'atteindre la nappe,
- la perméabilité de la zone non saturée qui rend compte du potentiel de migration verticale de la source vers la nappe,
- la perméabilité de l'aquifère ou vitesse de transfert qui rend compte du potentiel de migration horizontale dans la nappe.

Cible

Le type de facteur « cible » regroupe sept facteurs qui caractérisent les usages humains qui peuvent conduire à une exposition à la source :

- l'accès à la source,
- la présence de population sur le site,
- le type de population présente sur le site,
- la proximité du captage d'eaux souterraines le plus proche,
- la distance à l'eau de surface la plus proche,
- le nombre de personnes concernées par l'Alimentation en Eau Potable (AEP),
- les autres usages de l'eau.

Constat d'impact

Les facteurs regroupés sous l'appellation « constat d'un impact » permettent de rendre compte à partir de résultats d'analyses et de mesures d'un impact constaté. L'importance de l'impact est apprécié relativement aux Valeurs de Constat d'Impact (VCI) définies à cet effet. Les VCI sont définies en fonction des différents milieux. Par exemple pour les sols, les VCI sont des concentrations de polluants dans les sols exprimées en mg de polluants par kg de terre sèche (mg/kg). Ces valeurs sont définies à partir d'un modèle simple de transfert des polluants et de scénarios standards qui rendent compte des différentes possibilités d'usage d'un site (Bonnard et al. 2001).

Calcul de synthèse

Le calcul permettant l'obtention de la note de synthèse est différent selon les milieux d'exposition et selon les usages car tous les facteurs ne sont pas systématiquement renseignés. Par exemple, pour les eaux souterraines, le potentiel de ruissellement n'est pas pris en compte, alors que pour les eaux superficielles, ce sont les facteurs relatifs au potentiel de transfert qui ne sont pas pertinents.

De plus, la formule mathématique qui combine les notes des facteurs ne leur affecte pas à chacun le même poids. Ainsi, la note de la mobilité est multipliée par la note de l'état physique de la source alors que les autres notes sont seulement ajoutées. La note du paramètre « ruissellement » est affecté d'un coefficient multiplicatif de 2 alors que la note de l'impact constaté est affecté d'un coefficient multiplicatif de 9 dans le cas d'eaux souterraines considérées comme ressource future par le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) et seulement 6 dans les autres cas (usage en Alimentation en Eau Potable (AEP) ou autres usages).

Un programme a été développé sous EXCEL pour la réalisation de ces calculs.

La finalité de l'évaluation simplifiée des risques est la classification des sites en trois catégories :

- classe 1 : les sites devant faire l'objet d'investigations approfondies et éventuellement d'une évaluation détaillée des risques,
- classe 2 : les sites « à surveiller »,
- classe 3 : les sites dits « banalisables », c'est-à-dire ne nécessitant pas d'autres investigations pour les conditions d'usage et d'environnement pour lesquelles l'évaluation simplifiée des risques a été réalisée.

Les « ? » permettent de prendre en compte l'imprécision de l'information fournie ou sa faible fiabilité. Si plus de 30% de la note globale correspond aux paramètres notés « ? »

en tenant compte des coefficients multiplicatifs et de l'agrégation des paramètres, l'information est jugée insuffisante pour attribuer une note de synthèse globale.

Il faut cependant signaler que cette méthode est actuellement en cours de refonte au sein d'un groupe de travail du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable.

3.2.2. Volet radiologique

Un volet radiologique a été développé pour les sites industriels potentiellement contaminés par des substances radioactives (IRSN 2001). La méthode proposée est cependant relativement différente de celle utilisée pour les substances chimiques car ce n'est pas une méthode de notation basée sur la combinaison de notes affectées à des critères multiples mais une méthode classique de calcul de l'impact dosimétrique. L'impact dosimétrique est obtenu par l'utilisation de modèles de transfert dans la géosphère et la biosphère et de modèles d'exposition mis en œuvre pour des scénarios couvrant l'ensemble des usages envisageables d'un site pollué.

La dose individuelle résultante de l'évaluation de l'impact dosimétrique doit ensuite être comparée à un niveau dit de sélection (NS) qui est « la dose individuelle au-dessus de laquelle la nécessité d'une réhabilitation doit être étudiée », la fixation de cette valeur incombant aux pouvoirs publics.

Bilan pour SENSIB :

Le concept de sensibilité n'est pas directement cité dans les documents de l'évaluation simplifiée des risques pour les sols pollués mais de nombreux parallèles apparaissent entre la méthode développée pour le volet chimique et la méthodologie proposée pour le projet SENSIB (Mercat-Rommens et Renaud 2003) (Figure 4). Ainsi, les 43 facteurs traités dans la méthodologie Sites pollués correspondent à ce que l'on appelle des facteurs de sensibilité dans SENSIB. L'attribution de notes pour ces 43 facteurs et la combinaison des notes est analogue à ce qui est envisagé dans SENSIB dans l'étape d'indigage des facteurs et dans la combinaison de ces indices pour obtenir un indice pour l'environnement. Enfin, la classification générale pour les sites pollués est le résultat opérationnel de l'application de la méthodologie Sites pollués. Dans SENSIB, le résultat opérationnel envisagé est aussi un système de classification des milieux de l'environnement et des territoires.

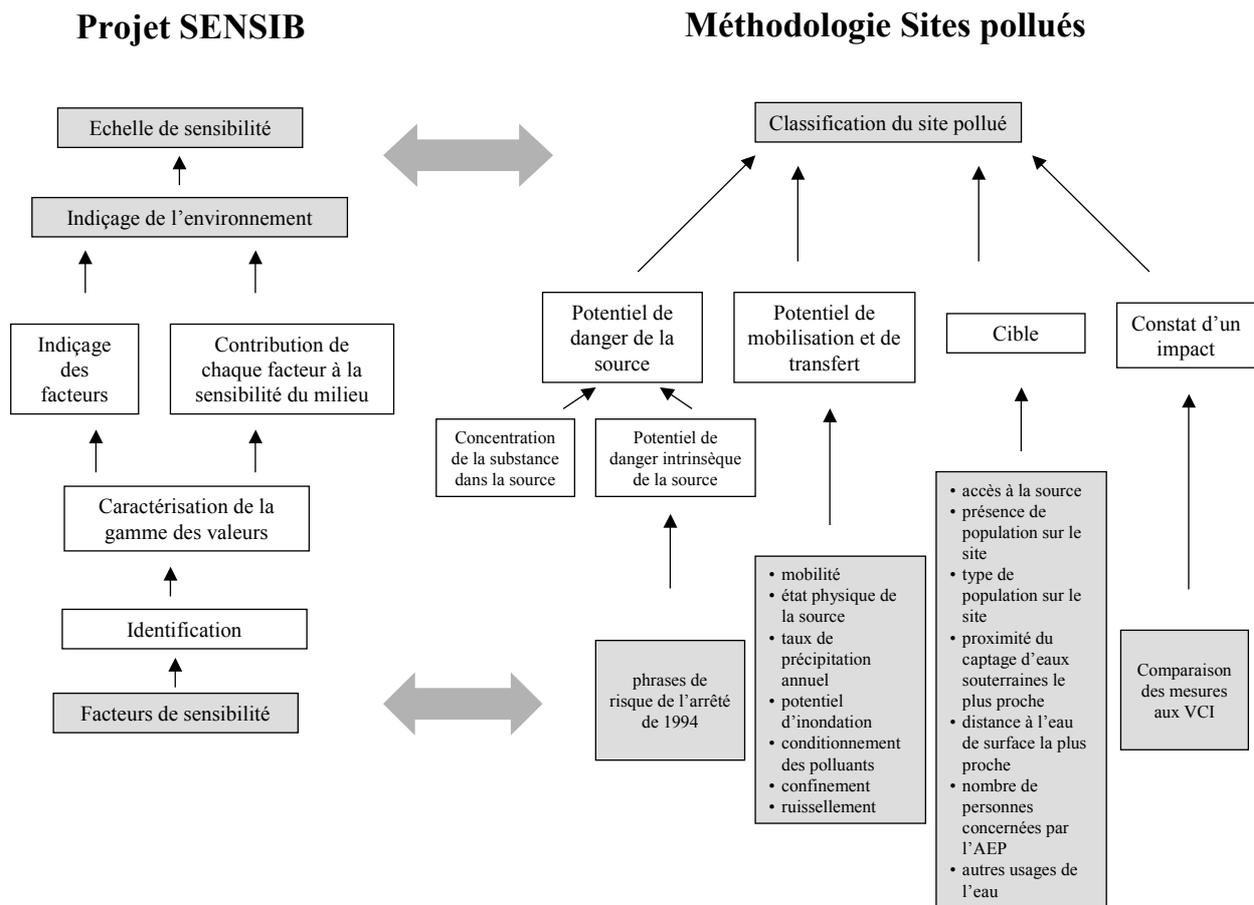


Figure 4 : Parallèles entre le projet SENSIB et la méthodologie Sites pollués

Ces parallèles permettent de tirer des enseignements directs du développement et de la mise en place de la méthode Sites pollués utilisables pour le projet SENSIB. Ces enseignements concernent différents thèmes :

- La combinaison de facteurs catégoriels (état physique de la source, conditionnement des polluants, confinement, ...) et de facteurs chiffrés (solubilité des substances, concentration de substance dans la source, taux de précipitation, ...) au sein de la méthodologie Sites pollués montre qu'il est possible de prendre en compte différents types de facteur dans un même processus d'évaluation.
- Certains facteurs pris en compte dans la méthodologie Sites pollués sont communs avec le domaine couvert par SENSIB (prise en compte de la pluviométrie, des inondations, du ruissellement, ...). Le développement du projet pourra profiter des acquis de la méthodologie Sites pollués et devra veiller à la cohérence avec celle-ci.
- Bien que le champ des milieux couverts par la méthodologie Sites pollués soit restreint à la géosphère, les situations envisagées sont déjà nombreuses. Puisque l'ambition du projet Sensibilité est de couvrir de nombreux milieux, les techniques d'analyse de sensibilité devront être particulièrement étudiées pour permettre d'identifier les facteurs de sensibilité prépondérants.
- Les choix de simplification réalisés pour la méthodologie Sites pollués (l'écotoxicité n'est pas prise en compte) devront être réexaminés à la lumière des enjeux du projet SENSIB.
- L'imprécision de l'information fournie ou sa faible fiabilité sont pris en compte uniquement au travers d'un indicateur qualitatif « ? ». Cet indicateur est ensuite

reporté dans les calculs et sert à répondre au critère oui/non qui rend compte de la fiabilité de la note finale attribuée au site. Si le critère est oui, le site peut-être classé, sinon on ne peut pas dire grand chose et il faut acquérir de l'information. La difficulté à gérer l'incertitude transparaît dans la méthodologie Sites pollués et la prise en compte des incertitudes devra constituer un thème de réflexion fort du projet SENSIB.

- Enfin, l'application pratique de la méthodologie Sites pollués à des cas réels a parfois soulevé des questions d'éthique ; les VCI, par exemple, ne doivent pas être considérées comme des « droits à polluer ». La prise en compte de ce type de questions en amont du projet SENSIB doit être envisagée afin de limiter les potentielles perceptions négatives inhérentes à une classification du territoire.

3.3. Etude de la vulnérabilité des nappes autour des sites nucléaires

En 1986, le BRGM a réalisé pour le CEA des études cartographiques dans l'optique d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines à une contamination possible autour des sites nucléaires français. Pour chaque nappe, le « degré de vulnérabilité » a été exprimé par un indicateur appelé indice ou classe qui varie entre A, B et C (1, 2 ou 3) par ordre décroissant de sensibilité aux pollutions déversées en surface. Pour une nappe de classe A ou 1, toute pollution accidentelle doit entraîner la mise en œuvre rapide d'un procédé de décontamination : aquifère très sensible. Pour une nappe de classe B ou 2, les vitesses de pénétration verticale sont en général assez lentes mais toute contamination se retrouvera à terme dans l'aquifère : aquifère sensible. Enfin, les formations de classe C ou 3 sont peu productives et pratiquement inexploitable : aquifères peu ou non sensibles.

Les classes de vulnérabilité traduisent l'aptitude du réservoir aquifère :

- à se laisser pénétrer par un flux de polluant : c'est la perméabilité verticale ou la fracturation des terrains surmontant le réservoir qui est évaluée,
- à se laisser traverser latéralement par la pollution ; c'est la perméabilité horizontale ou la fracturation des terrains constituant le réservoir qui est évaluée.

La figure 5 présente un exemple de tableau renseignant les critères de classification des aquifères ayant permis l'établissement de l'indice de vulnérabilité par le BRGM.

	Nappe ou formation aquifère	Profondeur moyenne de la nappe (m)	Battelement maxi. de la nappe (m)	Profondeur du mur de la nappe (m)	Perméabilité moyenne K (m/s)	Indice de vulnérabilité
1	2 à 3	< 2	10	10^{-3} à 10^{-2}		A
	Couverture épaisse de limons 154m			10^{-7}		
2	?	?	995. m.	$\approx 10^{-5}$		B
3	Très variable	?	?	$\frac{10^{-6}}{10^{-5}}$		B
4	/	/	/	10^{-9} à 10^{-7}		C
5	?	?	?	$\approx 10^{-5}$		B

Figure 5 : Les critères d'établissement de l'indice de vulnérabilité

Bilan pour SENSIB :

Cet exemple montre que les concepts de vulnérabilité et de sensibilité ne sont pas une notion récente dans le domaine de l'environnement. Ces concepts ont été et sont fréquemment utilisés notamment pour la gestion des nappes et de la ressource en eau. Dans cette exemple historique, le concept de vulnérabilité est confondu avec le concept de sensibilité, ce qui illustre la difficulté fréquente de distinguer ces deux concepts.

3.4. Classification des zones vulnérables vis à vis des nitrates

Le second exemple d'application de ces concepts pour les nappes qui est présenté ici concerne la Directive Nitrate de l'Union européenne (91/976/EC). Cette directive de 1991 demande aux états membres de réduire globalement les rejets agricoles de nitrates sur leur territoire ou de mettre en place des mesures de réduction sur les zones dites vulnérable aux nitrates et définies comme NVZ (Nitrate Vulnerable Zones). Cette directive a été transcrite en droit français par le décret du 27 août 1993. Les zones désignées comme vulnérables sont de deux types :

- Les zones définies comme atteintes par la pollution, à savoir les eaux souterraines et les eaux douces superficielles dont la teneur en nitrates est supérieure à 50 milligrammes par litre, ainsi que les eaux des estuaires, les eaux côtières et marines ayant subi une eutrophisation susceptible d'être combattue de manière efficace par une réduction des apports d'azote.
- Les zones définies comme menacées par la pollution, à savoir les eaux souterraines et les eaux douces superficielles, notamment celles servant au captage d'eau

destinée à la consommation humaine, dont la teneur en nitrates est comprise entre 40 et 50 milligrammes par litre et montrent une tendance à la hausse, ainsi que les eaux des estuaires, les eaux côtières et marines dont les principales caractéristiques montrent une tendance à une eutrophisation susceptible d'être combattue de manière efficace par une réduction des apports d'azote.

La vulnérabilité est donc définie ici sous l'angle des effets constatés.

Pour répondre à la directive européenne, les britanniques ont entrepris un classement préalable des zones dites sensibles vis à vis des nitrates en construisant un système géographique avec les informations correspondant aux facteurs influençant la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions par les nitrates (Lake *et al.* 2003). Ce système regroupe quatre types d'informations :

- le potentiel de lixiviation,
- les caractéristiques du sol qui peuvent atténuer la pollution par les nitrates ou conduire à des mouvements d'eaux horizontaux,
- les caractéristiques de couverture de la nappe,
- le type d'aquifère : distinction entre les unités géologiques fracturées et/ou hautement perméables et les unités géologiques peu perméables.

Bilan pour SENSIB :

Cet exemple montre d'une part que le concept de vulnérabilité est utilisable dans la réglementation et d'autre part que l'application des concepts de vulnérabilité (Directive européenne) et de sensibilité (classement proposé par les Britanniques) pour les nappes peut se traduire de différentes façons. Quelle que soit l'application choisie, l'objectif opérationnel est d'obtenir un classement des surfaces afin de mieux gérer les situations de contamination. Cet objectif de classification des surfaces en vue de leur gestion est aussi un enjeu du projet SENSIB, notamment dans le cadre de la gestion post-accidentelle des pollutions radioactives.

3.5. Classification des bassins versants en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires

Le Groupe Régional Eau et Produits Phytosanitaires d'Alsace, à la demande du préfet de région, a commandé un travail de classification des bassins versants alsaciens vis à vis du risque de pollution diffuse, afin d'optimiser la mise en place d'actions visant à réduire les pollutions des eaux superficielles et souterraines par les produits phytosanitaires. Pour répondre à cette demande, en 2002, une étude portant sur les 8300 km² de cette région découpés en 32 bassins versants, a été réalisée par l'Association pour la PROtection de la Nappe phréatique de la plaine d'Alsace (APRONA) et l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (GISSOL 2004).

Cette étude basée sur l'évaluation de la sensibilité potentielle des bassins versants aux produits phytosanitaires repose sur la connaissance qualitative des processus en jeu. La sensibilité a été déterminée à partir de ce que les auteurs ont appelé la vulnérabilité (aptitude d'une ressource en eau à être atteinte par une pollution), modulée par les phénomènes de dilution potentielle de la pollution par les masses d'eau. L'évaluation de la vulnérabilité des bassins versants a été réalisée en trois étapes :

- définition des modes d'écoulements et répartition des flux d'eau vers les eaux superficielles ou vers les eaux souterraines à partir d'une combinaison des données de pente et des caractéristiques des sols pour obtenir des notes de battance, perméabilité du sol en surface, hydromorphie, présence de rupture de perméabilité, pour deux saisons climatiques différenciées par le régime de précipitations,

- modulation des notes fixées à l'étape précédente par la prise en compte du temps de transfert des flux d'eau vers la ou les sources exposées à partir des données sur la densité du réseau hydrographique, le drainage agricole et l'épaisseur de la zone non-saturée,
- modulation des notes fixées à l'étape précédente par l'occupation du sol.

Cette étude a conduit à produire des cartes synthétiques sur la sensibilité des eaux superficielles et souterraines.

Selon les auteurs, l'étude a ainsi contribué à la cartographie des zones prioritaires à l'échelle de la région. Elle constitue :

- une aide à la décision pour la mise en place d'actions dans les zones sensibles,
- une aide pour le choix de secteurs prioritaires pour le renforcement du réseau de surveillance de la qualité des eaux superficielles et souterraines vis à vis des produits phytosanitaires.

Bilan pour SENSIB :

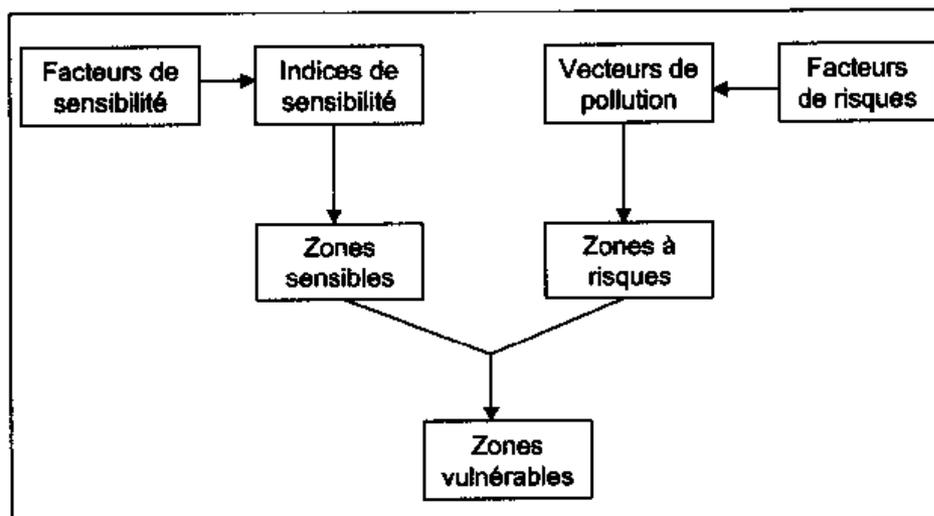
Cet exemple illustre de nouveau les différences de définition des concepts de sensibilité et de vulnérabilité et cependant l'existence de liens forts entre les deux concepts.

Cet exemple illustre aussi le double intérêt opérationnel du concept de sensibilité non seulement comme outil pour décider de contre-mesures dans un contexte de contamination mais aussi comme outil pour dimensionner et orienter un réseau de surveillance.

3.6. Méthodologie de gestion des zones côtières de l'IFREMER

Le littoral est un milieu sur lequel s'exerce de nombreuses pressions écologiques, économiques, sociales, ... La nécessité d'une gestion raisonnée de ce milieu a conduit l'IFREMER à développer une approche méthodologique pour traiter l'information environnementale disponible afin d'aider à une prise de décision éclairée par les gestionnaires (Denis 1997). Cette réflexion méthodologique a été réalisée en différentes étapes : définition de critères de zonation de l'espace côtier, qualification des unités territoriales délimitées, choix d'un mode de traitement des données, construction d'indices synthétiques et définition de modes de représentation qui privilégient l'information géographique. Des résultats opérationnels de cette réflexion ont été obtenus tant dans le domaine de la gestion des risques post-accidentel par l'élaboration d'atlas de sensibilité aux pollutions marines accidentelles (IFREMER 1997) que dans le domaine des risques chroniques par le développement de guides pour l'élaboration de plan de gestion intégrée de la zone côtière (UNESCO 1997, 2000, 2001).

L'IFREMER définit la « Sensibilité » comme un élément intrinsèque au milieu qui, combiné au « Risque », conduit à déterminer la « Vulnérabilité » (Figure 6).



issue de Ref : thèse J. Denis

Figure 6 : Articulation entre vulnérabilité et sensibilité selon l'IFREMER

Le premier cas d'application de la méthodologie de classification de l'IFREMER a concerné le littoral méditerranéen dans le cadre de l'élaboration du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) Rhône-Méditerranée-Corse en 1995. La première étape a consisté en un découpage du territoire en 50 zones considérées comme des unités cohérentes de gestion sur la base de critères géomorphologiques. Chacune de ces zones a ensuite été qualifiée selon des critères physiques, biologiques, socio-économiques et des critères d'état, eux-mêmes définis par des ensembles de paramètres descriptifs ou dynamiques (figure 7). Pour chaque paramètre, des modalités de codification sont définies en fonction des valeurs que peut prendre le paramètre ou de la catégorie à laquelle le paramètre appartient. La classification des zones est ensuite obtenue à partir du traitement des données recueillies pour chaque paramètre. Un module de traitement des données a été développé sur station SUN avec une interface utilisateur nommée INDIAS. Les indices synthétiques de chaque critère sont ensuite regroupés en un indice global pour constituer un triplet¹ (biologique, socio-économique, état) attaché à chaque zone. Le regroupement de ces triplets a fait apparaître 16 groupes distincts de zones qui ont ensuite fait l'objet de regroupement.

¹ Quid des critères physiques ?

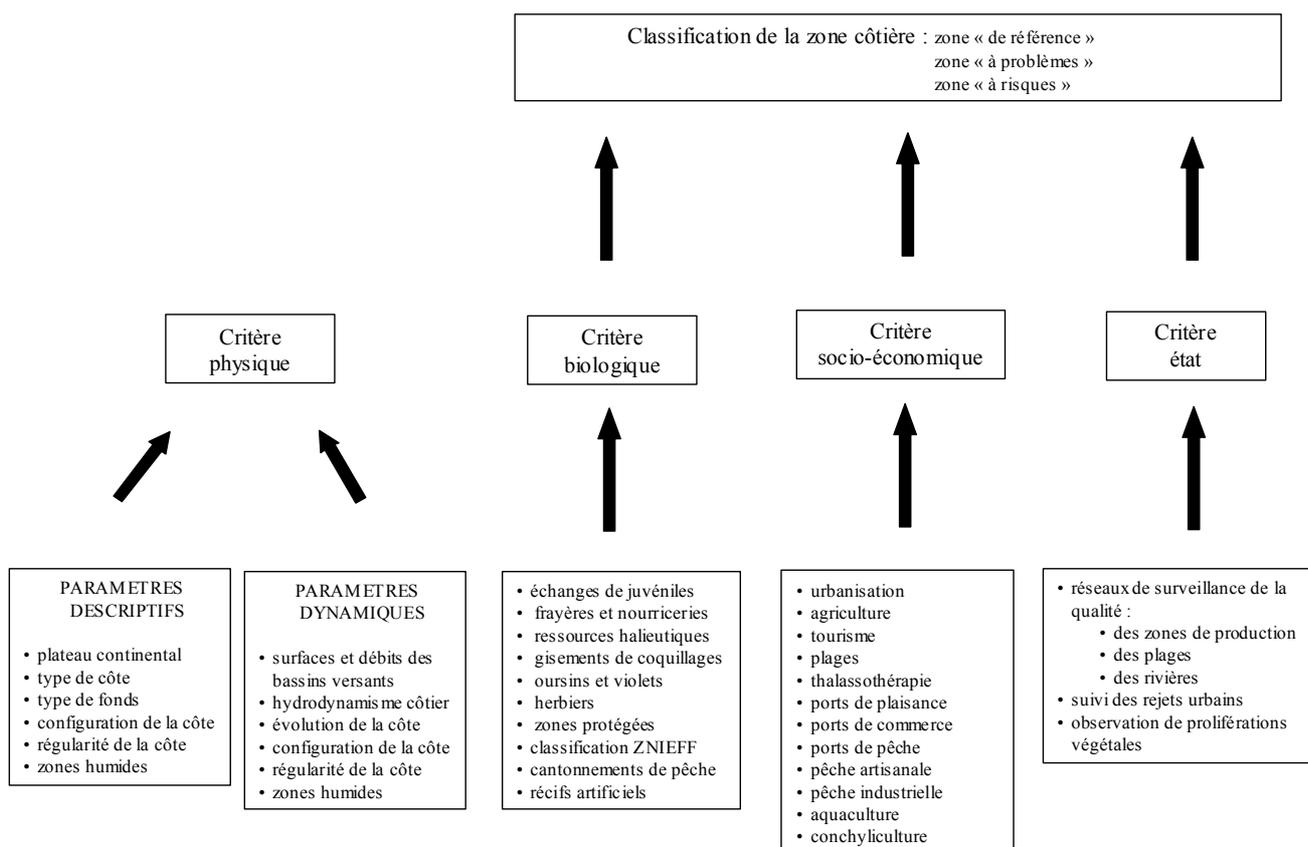


Figure 7 : les critères de classification des zones côtières

Au final 10 types de zone ont été retenues (A à J) avec trois statuts différents :

- des zones « de référence » qui se caractérisent par une pression anthropique et un état du milieu faibles à moyens, pour une valeur biologique faible ou forte,
- des zones « à problèmes » qui se caractérisent par des pressions anthropiques et un état du milieu moyens à forts, pour une valeur biologique faible à moyenne,
- des zones « à risque » qui se caractérisent par une pression anthropique et un état du milieu moyens à forts, pour une valeur biologique moyenne à forte.

Les informations collectées sont synthétisées dans une carte d'identité pour chaque zone et l'information est représentée aux moyens de jeux de cartes thématiques (figure 8). Ces cartes ont notamment pour vocation la communication vers les élus.

L'application de la méthodologie de gestion des zones côtières au cas de la Méditerranée a notamment servi de support à la conception du réseau d'observation et de mesures de la qualité du milieu marin méditerranéen, le réseau RLM (Réseau Littoral Méditerranéen). Par exemple, dans le cadre du RLM, le réseau RINBIO (Réseau d'INtégrateurs BIOlogiques) a été créé en 1996 sur la base du référentiel géographique issu de l'application de la méthodologie de gestion des zones côtières.

4 - Milieux - Protection et gestion

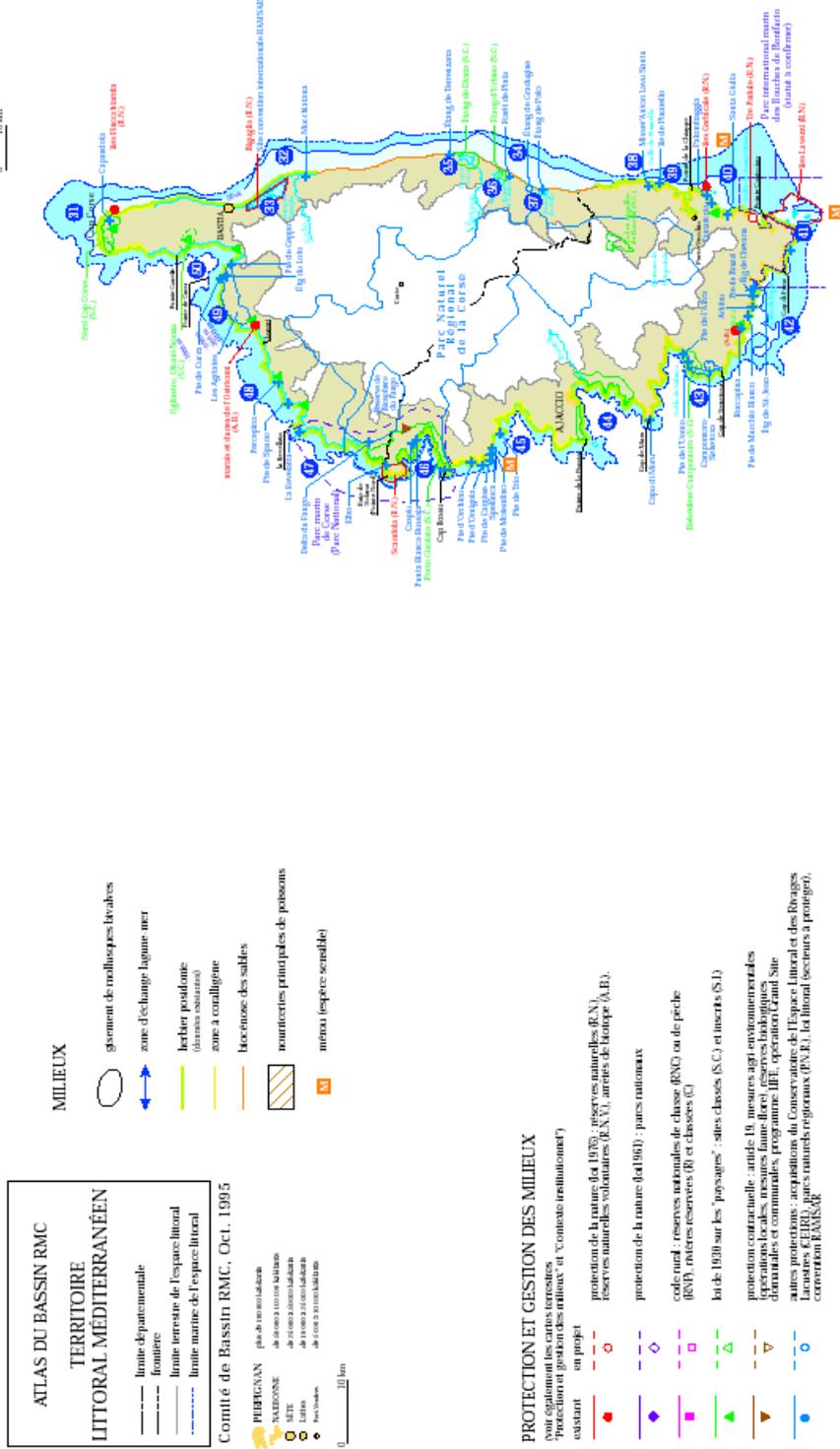


Figure 8 : Exemple de carte thématique élaborée à partir de la classification des zones côtières

Bilan pour SENSIB :

L'utilisation du concept de sensibilité et son application dans des méthodes de classification permet d'obtenir des résultats opérationnels à la fois dans le domaine des risques chroniques (guide) et dans le domaine des risques accidentels (atlas). Le projet SENSIB a aussi pour objectif de fournir des résultats utilisables dans ces deux domaines.

De même que pour la méthodologie Sols pollués, de nombreux parallèles apparaissent entre la méthode développée pour la classification des zones côtières et la méthodologie proposée pour le projet SENSIB. Ces parallèles sont illustrés par la figure 9.

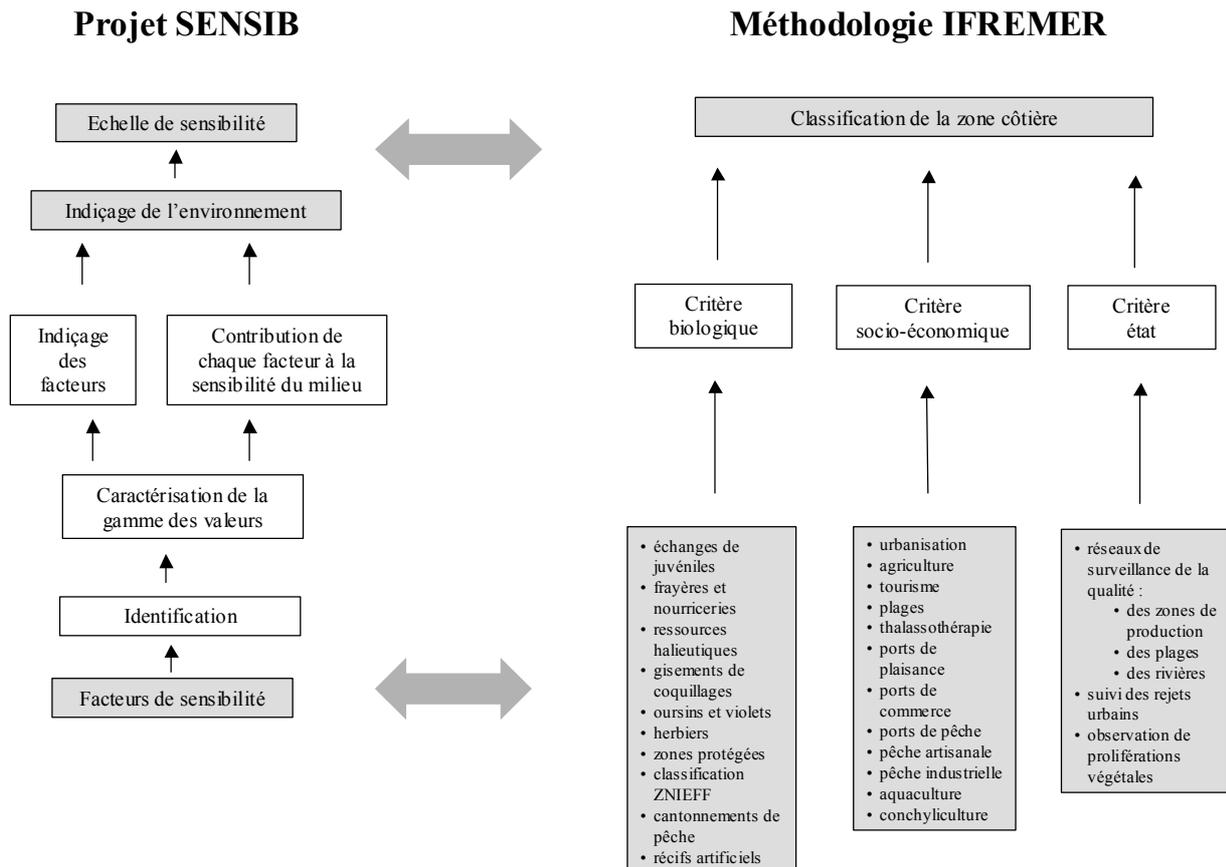


Figure 9 : Parallèles entre le projet SENSIB et la méthodologie de classification des zones côtières de l'IFREMER

Un autre point commun entre le projet SENSIB et la méthodologie IFREMER est la séparation entre la sensibilité du milieu et les facteurs de risque, la combinaison des deux aboutissant au concept de vulnérabilité.

Enfin, on retrouve aussi dans cet exemple l'intérêt du concept de sensibilité comme outil pour dimensionner le déploiement de réseaux de surveillance.

3.7. Autres exemples

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 (Hamerlinck and Arneson 1998). 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 (Nilsson *et al.* 2001). 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.

Le concept de vulnérabilité est de plus en plus utilisé dans le domaine de l'étude des conséquences des changements climatiques et plus globalement pour la problématique du développement durable. Une récente étude américaine (Luers *et al.* 2003) propose une nouvelle approche de la vulnérabilité basée sur quatre concepts : l'état du système par rapport à un seuil de dommage, la sensibilité, l'exposition et la capacité d'adaptation.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LE PROJET SENSIB

Les exemples d'utilisation des concepts de vulnérabilité et de sensibilité sont nombreux et recouvrent différents domaines : protection de la ressource en eau, radioécologie, gestion de crise, classification des zones côtières. D'autres exemples auraient pu être détaillés, notamment dans le domaine du développement durable (Clark *et al.* 2000) (IPCC 2001), mais l'objectif recherché dans ce rapport n'est pas l'exhaustivité mais l'identification des possibilités et des limites d'application du concept de sensibilité. Les exemples choisis ici permettent de souligner certaines possibilités ou au contraire certaines difficultés inhérentes à l'utilisation de ces concepts et autour desquelles le projet Sensibilité Radioécologique devra être structuré :

- Les expériences d'utilisation du concept de sensibilité existent pour certains milieux (sols, nappes, littoral) mais à notre connaissance, il n'y a pas eu encore d'exemple d'intégration de l'ensemble des milieux. Cette intégration des milieux est l'un des objectifs du projet SENSIB.
- Si les concepts de vulnérabilité et de sensibilité semblent globalement 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 SENSIB est résolument orienté sur l'étude de la sensibilité de l'environnement, l'aspect vulnérabilité sera probablement abordé au cours du projet.
- Le concept de sensibilité permet des applications aussi bien dans le champ des risques chroniques que dans celui des risques accidentels. Le projet SENSIB couvrira ces deux domaines des risques liés aux substances radioactives.
- Les difficultés mises en évidence dans les exemples présentés concernent notamment la prise en compte des incertitudes, la communication et la « bonne » utilisation des résultats, les méthodes permettant de prendre en compte de nombreux critères. Ces thèmes devront être étudiés dans le projet SENSIB.

- 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. Le projet SENSIB intégrera une réflexion sur les outils de représentation disponibles et leur pertinence par rapport aux résultats du projet.
- Le projet SENSIB s'appuiera sur les exemples présentés non seulement d'un point de vue méthodologique, mais aussi en utilisant les méthodes de classification existantes pour les milieux de l'environnement déjà couverts, et en les fédérant dans un outil homogène intégrant l'ensemble des milieux concernés par les pollutions radioactives.

Ces enseignements conduisent à envisager différentes études pour réaliser et/ou consolider les étapes méthodologiques du projet SENSIB décrites dans (Mercat et Renaud 2003) et rappelées en figure 10.

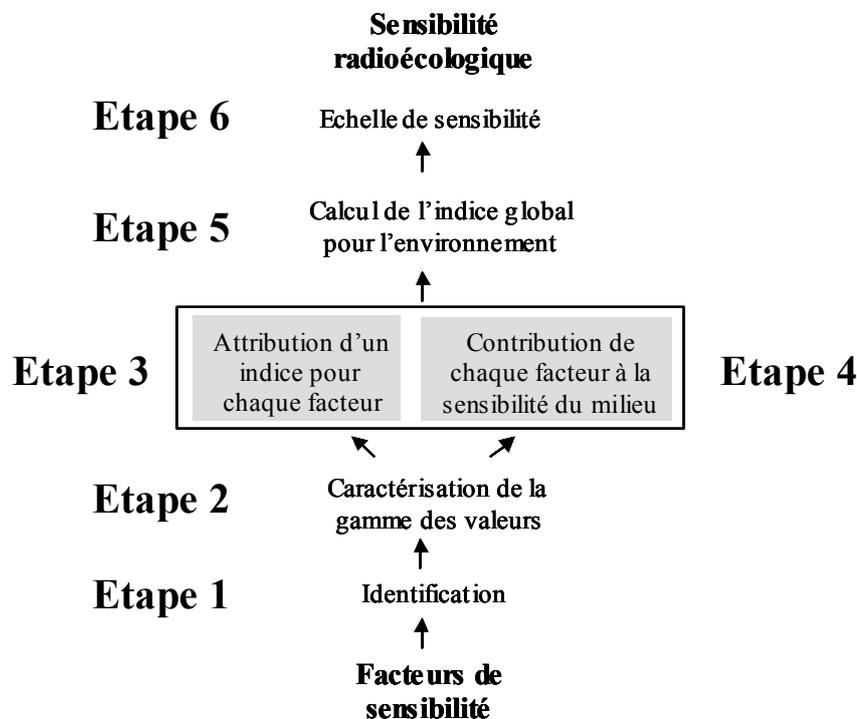


Figure 10 : Les étapes du projet Sensibilité Radioécologique

Pour chaque étape, la réalisation du projet SENSIB nécessite d'initier ou de fédérer (lorsque ces études existent déjà avec leurs objectifs propres) différentes études. Ces études seront regroupées en deux catégories (Figure 11) :

- les études thématiques qui concernent certains thèmes du projet ou certaines étapes 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),
- les études applicatives pour lesquelles l'ensemble des étapes du projet sont déroulées mais avec des objectifs limités à certains milieux de l'environnement ou à certains champs du risque (approche verticale).

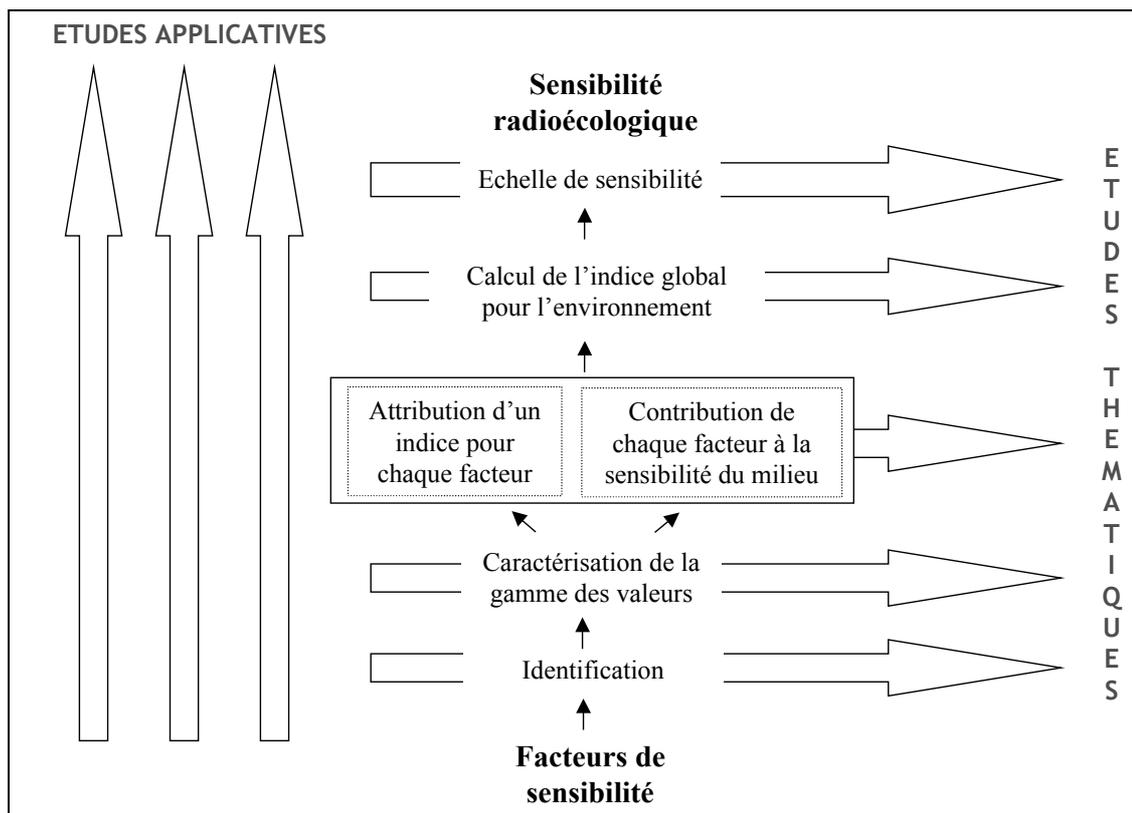


Figure 11 : Les deux types d'études du projet SENSIB

La combinaison des approches verticale et horizontale doit permettre à terme de décrire l'ensemble des dimensions du projet.

Les études thématiques proposées dans le cadre du projet SENSIB à l'horizon 2005-2008 sont les suivantes :

- étude comparative de la sensibilité radioécologique de deux sites nucléaires : Marcoule et La Hague,
- comparaison entre les écosystèmes d'altitude et les écosystèmes de plaine : le cas des dépôts humides,
- comparaison entre les écosystèmes tropicaux et les écosystèmes tempérés : le cas des transferts du sol vers la chaîne alimentaire,
- études pour améliorer la prise en compte des interfaces entre les milieux via le compartiment sol : migration verticale, érosion, apport d'éléments solides lors des inondations,
- essai de classification du territoire : l'exemple du Kazakhstan,
- études pour améliorer la connaissance des facteurs de sensibilité liées aux comportements des populations,
- réflexion sur la représentation de la connaissance et le traitement des incertitudes,
- développement de méthodes d'analyse de sensibilité permettant de prendre en compte des critères parfois très nombreux,

- réflexion sur la représentation des résultats, notamment au travers de moyens cartographiques et sur la communication autour des résultats et leur perception par les différents utilisateurs.

Les thèmes proposés pour les premières applications du projet SENSIB sont les suivants :

- les milieux agricoles,
- la gestion post-accidentelle d'un accident avec rejet radioactif dans l'environnement,
- l'optimisation de la méthodologie d'analyse des dossiers d'autorisation de rejet et de prélèvement d'eau (DARPE).

Les modalités techniques de réalisation de ces études seront détaillées par les ingénieurs d'études concernés dans des rapports qui seront disponibles entre fin 2004 et mi-2005.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Aarkrog A. (1979) Environmental studies on radioecological sensitivity and variability with special emphasis on the fallout nuclides ^{90}Sr and ^{137}Cs
- AVAIL (Arctic Vulnerability to Radioactive Contamination (2002). Final Report (Contract number: IC15-CT98-0201), Borghuis A.M., Liland A. and Strand P., (Eds), Norwegian Radiation Protection Authority.
- Bonnard R., Hulot C. & Lévêque S. (2001) Méthode de calcul des Valeurs de Constat d'Impact dans les sols, Etude de l'INERIS pour le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.
- BRGM (2000) Gestion des sites (potentiellement) pollués, classeur-guide version 2, éditions du BRGM, Orléans, France
- Camplin W.C., Leonard P., J.R. Tipple & Duckett L., Radioactivity in freshwater systems in Cumbria (UK) following the Chernobyl accident. MAFF Fisheries Research Data Report n°18, Ministry of Agriculture Fisheries and Food, Lowestoft, UK, 1989
- Clark W.C. et al (2000) Assessing vulnerability to global environmental risks. Report of the workshop on vulnerability to global environmental change: Challenges for Research, Assessment and Decision Making, Warrenton, VA. Paper 2000-12. Harvard University, Cambridge MA
- Denis J. (1997) Développement et validation de méthodes de classification de la zone côtière : une contribution à sa gestion intégrée, Thèse présentée devant l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- Eriksson A. (1997) Basic data for decisions on remediation of agricultural areas after a radioactive fallout. A report to the Swedish National Expert Group on Cleanup Swedish Radiation Protection Authority: Stockholm
- GISSOL Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, Lettre d'information n°3, <http://gissol.orleans.inra.fr/index.php>, Juin 2004
- Hamerlinck and Arneson (1998) Wyoming groundwater vulnerability assessment handbook, SDVC Reprt 98-01
- Howard B.J., Wright S.M., Barnett C.L. (Eds.), (1999) Spatial analysis of vulnerable ecosystems in Europe: spatial and dynamic prediction of radiocesium fluxes into European foods (SAVE). Final report. 65pp. Commission of the European Communities.
- Howard B.J. et al. (2001) Radioecological Sensitivity Final Report : September 1998-March 2001, Center for Ecology & Hydrology, Natural Environment Research Council, March 2002
- ICRP60. (1993) Recommandations 1990 de la Commission Internationale de Protection Radiologique, Pergamon Press, Oxford
- IFREMER (1997) Atlas pour la preparation à la lutte et pour la lutte contre les pollutions marines accidentelles sur les côtes de Tunisie, application à la région de Sfax, Etude IFREMER, EMP, CEDRE, ENIS, REMPEC/IMO/UNEP.
- Iosjpe M., Brown J. & Strand P. (2002) Modified approach for box modelling of radiological consequences from releases into the marine environment. Journal of Environmental Radioactivity, 60, 91-103
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate change) (2001) Impacts, adaptation and vulnerability climate change 2001, Third Assessment Report of the IPCC, University Press, Cambridge, UK
- IRSN (2001) Gestion des sites potentiellement contaminés par des substances radioactives. Guide version 0, Edition IRSN, Fontenay-aux-Roses, France

Lake I.R., Lovett A.A., Hiscock K.M., Betson M., Foley A., Sunnenberg G., Evers S. & Fletcher S. (2003) Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS, *Journal of Environmental Management*, 68, pp. 315-328

Luers A.L., Lobell D.B., Sklar L.S., Addams C.L., Matson P.A. (2003) A method for quantifying vulnerability, applied to agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change* 13, pp.255-267

Mercat-Rommens C. et Renaud Ph. (2003). Lancement du projet Sensibilité radioécologique, Rapport IRSN/SESURE/LERCM 2003-02.

Nilsson J., Magnusson S.E., Hallin P.O., Lenntorp B. (2001) Vulnerability analysis and auditing of municipalities, Lund University, Suède

Strand P., Balonov M., Bewers M., Howard B.J., Tsaturov Y., Salo A. et al, editors. Arctic Monitoring and Assessment Program. AMAP, 1997

UNESCO (1997) Guide méthodologique d'aide à la gestion intégrée des zones côtières./ IOC, Manulas and Guides n°36.

UNESCO (2000) Guide méthodologique pour l'élaboration de cartes de vulnérabilité des zones côtières de l'Océan Indien. COI, Manuels et Guides n°38.

UNESCO (2001) Des outils et des hommes pour une gestion intégrée des zones côtières, COI, Manuels et Guides n°42.

Wright S.M., Crout N.M.J., Beresford N.A., Sanchez A., Kanyar B., The identification of areas vulnerable to radiocesium deposition in Hungary, 1998

6. LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : DEFINITION DE LA SENSIBILITE RADIOECOLOGIQUE	5
FIGURE 2 : LES INDICATEURS DE SENSIBILITE PROPOSES LORS DU FORUM RADIOECOLOGICAL SENSITIVITY	7
FIGURE 3 : L'ARBORESCENCE DE LA METHODOLOGIE SITES POLLUES	8
FIGURE 4 : PARALLELES ENTRE LE PROJET SENSIB ET LA METHODOLOGIE SITES POLLUES	12
FIGURE 5 : LES CRITERES D'ETABLISSEMENT DE L'INDICE DE VULNERABILITE.....	14
FIGURE 6 : ARTICULATION ENTRE VULNERABILITE ET SENSIBILITE SELON L'IFREMER	17
FIGURE 7 : LES CRITERES DE CLASSIFICATION DES ZONES COTIERES	18
FIGURE 8 : EXEMPLE DE CARTE THEMATIQUE ELABOREE A PARTIR DE LA CLASSIFICATION DES ZONES COTIERES	19
FIGURE 9 : PARALLELES ENTRE LE PROJET SENSIB ET LA METHODOLOGIE DE CLASSIFICATION DES ZONES COTIERES DE L'IFREMER	20
FIGURE 10 : LES ETAPES DU PROJET SENSIBILITE RADIOECOLOGIQUE	22
FIGURE 11 : LES DEUX TYPES D'ETUDES DU PROJET SENSIB	23