

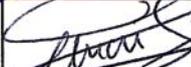
**IRSN**INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**Sensibilité comparée  
de deux sites nucléaires :  
cas des productions agricoles  
contaminées par voie foliaire  
(rejet chronique)**

Projet SENSIB

C. MERCAT - C. VASSAS

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

Demandeur					
Référence de la demande					
Numéro de la fiche programme					
<p><b>Sensibilité comparée de deux sites nucléaires : cas des productions agricoles contaminées par voie foliaire (rejet chronique)</b></p> <p><b>Projet SENSIB</b></p> <p>Rapport DEI/SESURE n° 2005-34</p>					
	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur*	Chef du SESURE	Directeur DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	C. MERCAT	P. RENAUD	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	30/01/06	3/02/06	16/05/06	19/05/06	
Signatures					

\* rapport sous assurance de la qualité

## HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
0		C. VASSAS		Projet de document
1		C. MERCAT		Refonte complète
2		C. MERCAT		Prise en compte des remarques de S. Roussel-Debet et P. Renaud
3				Prise en compte des remarques de N. Lemaitre

## LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme
Carolyne VASSAS	IRSN / DEI / SESURE / LERCM (intérim)
Catherine MERCAT	IRSN / DEI / SESURE / LERCM

## LISTE DE DIFFUSION

Nom	Organisme
J. REPUSSARD	IRSN/DIR
M. BRIERE	IRSN/DIR
M. BOUVET	IRSN/DSDRE
J. LEWI	IRSN/DESTQ
MP BIGOT	IRSN/COM
F. SOULET	DESTQ/DISCT/CRIS
A. DESPRES	DRPH/SER/UETP
C. RINGEARD	DRPH/SER/UETP
D. CHAMPION	DEI/DIR
D. BOULAUD	DEI/DIR
B. DUFER	DEI/DIR
JM PERES	DEI/SARG
JC GARIEL	DEI/SECRE
P. DUBIAU	DEI/SESUC
JP MAIGNE	DEI/SIAR
MC ROBE	DEI/STEME
B. DESCAMPS	DEI/SESURE/LESE
P. CUENDET	DEI/SESURE/LVRE
P. RENAUD	DEI/SESURE/LERCM

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet SENSIB. Le principe est de mettre en place une démarche qui permette de comparer la sensibilité de deux sites en cas de rejet de radionucléides ; à titre d'illustration les sites de Marcoule et de La Hague sont considérés. On s'intéresse ici au cas des productions agricoles contaminées par voie foliaire lors d'un rejet chronique atmosphérique. Chaque site est caractérisé par des productions végétales et animales spécifiques. Les calculs d'activités donnent une information sur la sensibilité des produits (activités massiques et surfaciques) et sur la sensibilité des communes (activités totales). La contamination est supposée s'effectuer uniquement par transfert foliaire. Les radionucléides étudiés sont le césium 137, le cobalt 60, le strontium 90 et l'iode 131.

Pour le césium 137 et le cobalt 60, l'environnement agricole du site de Marcoule apparaît globalement plus sensible que celui de La Hague, au sens où l'activité totale en becquerels exportée par les productions agricoles produites sur la zone des 10 km autour du site est plus importante à Marcoule qu'à La Hague. Pour le strontium 90 et pour l'iode 131, les deux environnements agricoles sont globalement équivalents.

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

## SOMMAIRE

1. Introduction.....	8
2. Modélisation des transferts dans l'environnement agricole.....	9
3. Descriptif de l'environnement agricole des deux sites.....	11
3.1. Conditions météorologiques .....	11
3.2. Topographie .....	11
3.3. Productions végétales .....	12
3.3.1. Marcoule.....	12
3.3.2. La Hague.....	13
3.4. Productions animales.....	14
3.4.1. Marcoule.....	14
3.4.2. La Hague.....	15
3.5. Bilan.....	15
4. Résultats des calculs d'activités déposées sur les sols agricoles et d'activités dans les productions agricoles.....	17
4.1. Dépôt.....	17
4.1.1. Activités totales (Bq).....	17
4.1.2. Activités surfaciques (Bq.m <sup>-2</sup> ).....	17
4.1.3. Bilan pour SENSIB.....	17
4.2. Productions végétales.....	19
4.2.1. Activités totales (Bq).....	19
4.2.2. Activités massiques (Bq.kg <sup>-1</sup> ).....	19
4.2.3. Bilan pour SENSIB.....	21
4.3. Productions animales.....	22
4.3.1. Activités totales (Bq).....	22
4.3.2. Activités massiques (Bq.kg <sup>-1</sup> ).....	23
4.3.3. Bilan pour SENSIB.....	24
4.4. Sensibilité globale .....	24
5. Conclusion.....	28
Bibliographie.....	29
Annexe 1 : les équations de transfert aux productions végétales et animales ...	31
Annexe 2 : les paramètres radioécologiques.....	32
Annexe 3 : les principaux paramètres agronomiques .....	33

## 1. Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet SENSIB qui a pour objectif de développer une méthode de classification des territoires basée sur leur sensibilité radioécologique (Mercat-Rommens et Renaud, 2003).

Ce rapport présente un des premiers éléments d'élaboration de la démarche méthodologique d'évaluation de la sensibilité radioécologique. Il s'agit notamment d'illustrer et de quantifier de potentielles différences de sensibilité grâce à des exemples concrets à partir de la comparaison de la sensibilité du site de La Hague et du site de Marcoule à un rejet chronique atmosphérique de radionucléide. Le choix des sites a été motivé par les fortes différences qu'ils présentent en termes de situation géographique, climatologie et productions agricoles.

La comparaison repose sur le calcul des activités en césium 137, cobalt 60, strontium 90 et iode 131 dans les produits animaux et végétaux spécifiques aux deux sites, dans un rayon de 10 km autour des installations. Les activités dans le sol sont supposées dépendre uniquement des dépôts et l'activité initiale dans le sol est considérée comme nulle. Le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire se fait par voie foliaire uniquement, ce qui correspond à la première année d'un rejet chronique, pour laquelle on ne prend pas en compte le transfert par voie racinaire.

Les rejets étudiés sont des rejets chroniques atmosphériques, arbitrairement fixés à  $10^{10}$  Bq.an<sup>-1</sup> de chacun des radionucléides : césium 137 (période radioactive de 30,15 ans), cobalt 60 (période radioactive de 5,27 ans), strontium 90 (période radioactive de 28,15 ans) ou iode 131 (période radioactive de 8 jours). Il s'agit de rejets fictifs, indépendants des rejets réels des installations présentes sur ces sites.

Le césium est un radionucléide généralement considéré comme « mobile »<sup>1</sup> dans les végétaux et les productions animales par comparaison avec d'autres radionucléides. Le cobalt 60 est considéré comme mobile dans les végétaux mais moins dans les produits animaux. Le strontium 90 est par contre peu mobile dans les végétaux.

Il s'agit de vérifier si ces mobilités théoriques sont confirmées par nos estimations dans les différentes productions agricoles et quel est l'ordre de grandeur de l'activité globale en becquerels que l'on retrouve dans les denrées produites dans la zone des 10 km autour de ces deux sites.

Enfin, le cas particulier de l'iode 131 est étudié pour évaluer l'influence de la courte période radioactive sur la sensibilité des productions agricoles.

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

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

Cette étude fournit ainsi une illustration de l'application pratique du concept de sensibilité radioécologique (étapes 1, 2 et 4 du projet SENSIB - cf. Figure 1) et permet de

---

<sup>1</sup> Au sens de « facilement transférés/transloqués ».

constituer la base de données pour la comparaison de ces deux sites, cette base étant appelée à s'enrichir au cours du projet SENSIB en fonction des développements suivants :

- approfondissement des calculs menés dans l'environnement agricole en fonction de la mise à disposition de données supplémentaires ;
- déclinaison de la comparaison des sites de Marcoule et La Hague pour d'autres environnements que l'environnement agricole ;
- application des autres étapes du projet SENSIB aux sites de Marcoule et La Hague.

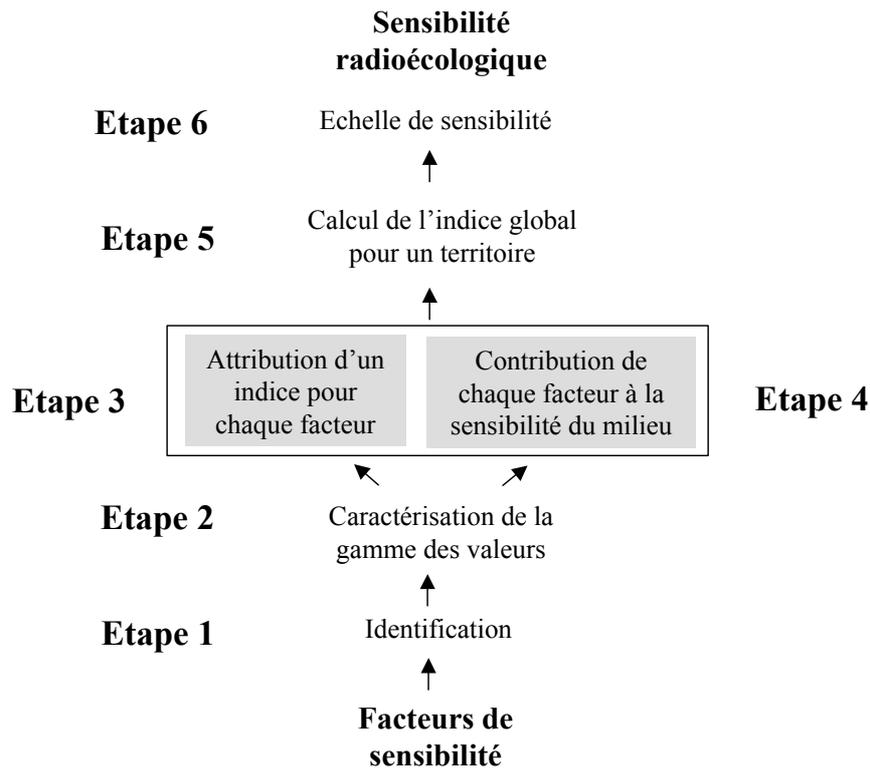


Figure 1 : les étapes du projet SENSIB

## 2. Modélisation des transferts dans l'environnement agricole

Pour calculer les activités totales (Bq) et les activités massiques (Bq.kg<sup>-1</sup>) des productions végétales et des productions animales, il est nécessaire d'évaluer préalablement les densités de dépôt qui constituent les données d'entrée des fonctions de transfert vers les productions agricoles.

Le modèle de dispersion et de dépôt dans l'environnement agricole utilisé est le modèle COTRAM dans FOCON96 (Rommens *et al.*, 1999) qui prend en compte la dispersion atmosphérique et les processus de dépôt vers les productions végétales et animales. A partir de la saisie de la valeur du rejet (10<sup>10</sup> Bq.an<sup>-1</sup>), de la hauteur de rejet spécifique de chacun des sites (cheminée considérée à 100 m de hauteur à La Hague et 70 m à Marcoule) et des roses des vents, FOCON96 fournit les débits de dépôts sec et humide (Bq.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>) qui sont utilisés comme données d'entrée pour les calculs de transfert dans les productions agricoles. Ceux-ci sont réalisés sur EXCEL©.

Les paramètres climatiques utilisés sont issus du CD « Le climat de la France » (Météo-France 1996) qui fournit une rose des vents moyenne sur 30 ans d'observations (1961-1990) pour les stations de Cap de La Hague pour le site de La Hague et d'Orange pour le site de Marcoule. Les roses des vents utilisées sont celles toutes conditions météorologiques confondues (il n'y a pas eu de distinction des directions et de la vitesse des vents en fonction du temps sec ou du temps de pluie).

La modélisation des transferts vers les productions végétales puis animales prend ensuite en compte de façon classique les phénomènes de captation, translocation et transfert vers le bétail via l'alimentation. Les équations de calculs des transferts aux productions animales et végétales sont reportées en annexe 1. L'activité issue des rejets se dépose dans un premier temps à la surface des végétaux. Ce phénomène est traduit par un rapport de captation qui dépend du végétal et du radionucléide en période de dépôt humide. On a donc distingué une captation en période de dépôt sec et une captation en période de dépôt humide. Une partie de l'activité interceptée par la plante est éliminée avant que l'homme n'en consomme la partie comestible. Cette activité est éliminée par le phénomène de décroissance radioactive et par les phénomènes d'élimination biomécanique (phénomènes biologiques de croissance de la plante et lessivage des feuilles). La modélisation utilisée fait la partition entre la partie consommée et non consommée de la plante et prend donc en compte le phénomène de translocation d'une fraction de l'activité des parties non consommées de la plante vers les parties consommées.

Le transfert des radionucléides aux animaux se fait par ingestion d'aliments contaminés. La voie d'atteinte par exposition interne des animaux par inhalation est négligeable par rapport à la voie ingestion. La voie inhalation n'est donc pas retenue. La consommation de fourrages et/ou de grain constitue l'essentiel de l'alimentation. On évalue ensuite la concentration des radionucléides dans les aliments d'origine animale consommés par l'homme, à savoir la viande, le lait et les œufs. Cette concentration est estimée par l'intermédiaire d'un facteur de transfert de l'activité au produit animal.

Les valeurs des paramètres radioécologiques intervenant dans les équations de transfert (rapports de captation par temps sec et par temps humide, constante de décroissance biomécanique, facteurs de transfert aux productions animales) sont issues de Merle-Szeremeta et Rommens (1999). Les valeurs sont reportées en annexe 2.

En ce qui concerne les paramètres agronomiques (rendement et temps de croissance), afin de prendre en compte la disparité régionale des productions, les classes de regroupement habituelles des productions agricoles (légumes feuilles, légumes fruits, légumes racines, herbe, céréales) ont été désagrégées. On a donc considéré indépendamment, chaque végétal et chaque production animale ; les données agronomiques correspondantes sont des données locales pour le rendement (données Agreste) et des données génériques pour les temps de croissance principalement issues du Larousse Agricole ou d'une compilation précédemment réalisée à l'IRSN (2001). Les valeurs sont reportées en annexe 3.

Les données agricoles (répartition des surfaces agricoles par type de cultures, nombre de têtes des différents animaux d'élevage) sont issues du recensement général de l'agriculture de 2000 et les données utilisées sont reportées dans les paragraphes suivants.

La modélisation utilisée permet de calculer les activités totales (Bq) et massiques (Bq.kg<sup>-1</sup>) pour chaque production végétale et animale. Ces deux résultats fournissent des informations différentes :

- les activités massiques permettent de déterminer quelles sont les productions agricoles les plus sensibles à une contamination,
- les activités totales contenues dans l'ensemble des productions agricoles, par commune, permettent de comparer les territoires (communes ou sites) entre eux et de rechercher les territoires globalement les plus sensibles.

### 3. Descriptif de l'environnement agricole des deux sites

#### 3.1. Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques des deux sites sont très différentes, notamment en termes de direction, fréquence et vitesses des vents (Figure 2). Le site de La Hague est sous influence du climat océanique ; les vents y sont fréquents mais faibles, dans toutes les directions alors que le site de Marcoule, de par son implantation dans la vallée du Rhône, est caractérisé par une direction dominante de vents Nord-Sud. La variabilité régionale des vents a été prise en compte grâce aux données du CD « Le climat de la France » (Météo-France 1996). Nous n'avons pas pu obtenir de roses des vents moyennes sur 30 ans qui soient spécifiques soit du temps sec, soit du temps de pluie. Les dépôts différents par temps sec et par temps humide ont donc été pris en compte dans cette étude uniquement au moyen de la fonction de COTRAM2 sous FOCON96 qui permet de recalculer des dépôts secs et humides à partir de la rose des vents moyennée sur l'ensemble des conditions climatiques (Deville-Cavelin *et al.* 1994).

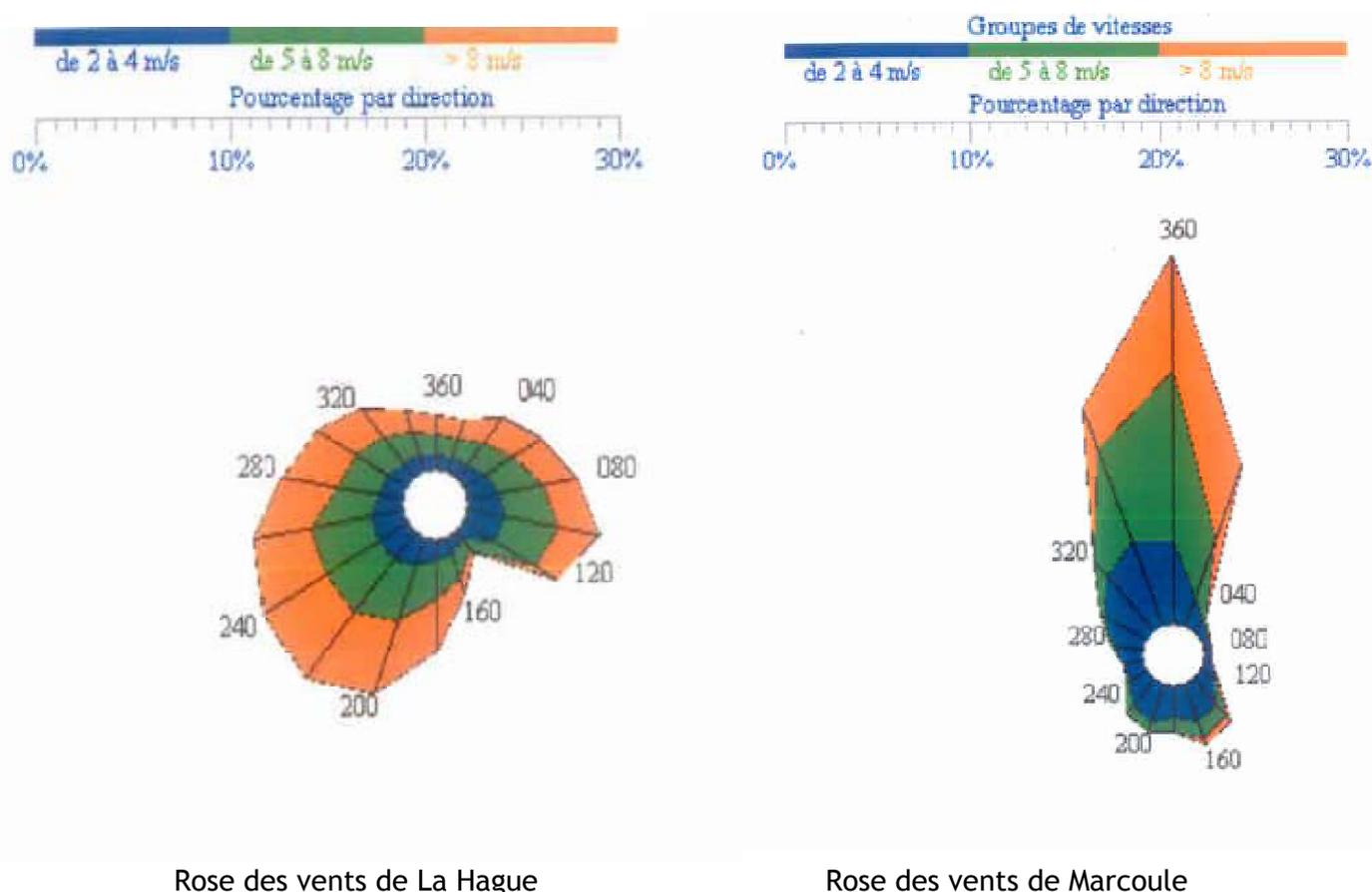


Figure 2 : Allures des roses des vents pour les sites de Marcoule et de La Hague (Météo-France 1996)

#### 3.2. Topographie

D'un point de vue topographique, les deux zones de 10 km autour des sites sont également très différentes du fait de la présence de la mer (Manche) dans l'environnement du site de La Hague. Les dépôts atmosphériques sur la mer, qui représente les 2/3 du territoire de la zone de 10 km autour de La Hague, sont donc considérés comme non disponibles pour

d'éventuels transferts vers les productions agricoles (le transfert de la mer vers la terre via les embruns est négligé).

### 3.3. Productions végétales

#### 3.3.1. Marcoule

Les productions végétales à Marcoule sont principalement des légumes (légumes fruits : tomate, melon, pomme, poire, pêche, cerise, vigne, abricot, olive, haricot et courgette; légumes feuilles : salade, chou et légumes racines : carotte, pomme de terre, asperge, oignon) mais aussi des céréales (blé dur) et des prairies. Le détail des surfaces de production par commune est présenté dans le tableau 1 ainsi que les tonnages estimés en utilisant les valeurs de l'annexe 3. Toutes ces productions sont destinées à la consommation humaine hormis l'herbe. Les valeurs du tableau 1 sont tirées directement du recensement général de l'agriculture (RGA) de 2000 pour la vigne et l'herbe (valeur pour la superficie fourragère principale). Nous avons considéré que les « céréales » du RGA étaient du blé dur. Pour les productions de serres, nous avons réparti les superficies données par le RGA à 60% pour le melon et 40% pour la tomate selon les statistiques départementales pour le Gard en 2003 (Agreste-Gard 2003). Pour les produits des vergers, la dénomination précise était parfois indiquée et dans ce cas nous avons utilisé directement les données du RGA. Si, pour des raisons de secret statistique, les dénominations n'étaient pas précisées, nous avons réparti les superficies de vergers selon les statistiques départementales pour le Gard de 2003, à savoir abricot 34%, cerise 9%, pêche 25%, olive 14%, poire 4%, pomme 13%. Le regroupement « légumes frais et pommes de terre » du RGA rassemble de nombreux légumes. Nous avons réparti ces superficies selon les statistiques départementales pour le Gard de 2003 en ne gardant que les fruits et les légumes représentant au moins 3% de la production totale, à savoir pomme de terre 13%, asperge 24% ; chou 3%, salade 11%, haricot 6%, courgette 11%, melon 20%, tomate 3%, carotte 6%, oignon 3%.

Tableau 1 : Productions végétales dans la zone des 10 km autour du site de Marcoule (à partir des données du RGA 2000)

Commune	Tomate (serre)		Melon (serre)		Pomme de terre		Asperge		Choux		Salades		Haricot		Courgette		Melon		Tomate		Carotte		
	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	
Bagnols-sur-Ceze	46	10888	69	2415																			
Caderousse																							
Chusclan																							
Codolet																							
Laudun					4	115	8	30	1	15	4	99	2	20	4	92	7	99	1	129	2	51	
Montfaucon	174	41091	260	9114	2	48	3	12			2	41	1	8	2	38	3	41			1	21	
Mornas																							
1/2 Orange																							
Orsan																							
Piolenc																							
Saint-Etienne-des-Sorts																							
Saint-Génies-de-Comolas																							
1/2 Saint-Laurent																							
Saint-Nazaire					1	19	1	5			1	16			1	15	1	16					
1/2 Saint-Paul					2	48	3	12			2	41	1	8	2	38	3	41			1	21	
1/2 Saint-Victor					2	59	4	16	1	8	2	51	1	11	2	47	4	51	1	66	1	26	
1/2 Tresques					10	261	18	68	2	33	8	225	5	46	8	208	15	225	2	291	5	115	
Venejan																							
somme	220	51979	329	11529	21	550	39	144	4	56	18	474	9	94	18	438	32	473	4	486	9	234	

Commune	Pommier		Poirier		Cerisier		Pêchers		Abricotier		Olivier		Oignon		Vigne		Blé dur		Herbe	
	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t
Bagnols-sur-CEZE	5	213	2	44	4	19	11	286	14	156	6	9			997	5982	39	148		
Caderousse	41	1599					19	517							14	84	556	2113		
Chusclan	1	51			1	4	3	68	3	37	2	2			701	4206				
Codolet	2	86													267	1602	9	34		
Laudun	4	152													1137	6822	28	106	5	25
Montfaucon	2	71	1	15	1	6	8	218	5	52	2	3			156	936	30	114		0
Mornas	58	2262	42	1096											44	264	142	540	20	98
1/2 Orange	49	1892	27	692	2	7	3	68							523	3138	304	1155	55	270
Orsan															342	2052	20	76		0
Piolenc	2	76	12	313	1	7	4	102	5	56	2	3			381	2286	524	1991	22	108
Saint-Etienne-des-Sorts	1	51			1	4	3	68	3	37	2	2			375	2250	26	99		0
Saint-Génies-de-Comolas															288	1728	20	76		0
1/2 Saint-Laurent															204	1221			10	49
Saint-Nazaire															221	1326	10	38	7	34
1/2 Saint-Paul							1	14	1	7					148	885	6	21		0
1/2 Saint-Victor							1	24	1	13	1	1			371	2223	21	80		0
1/2 Tresques	5	205	2	42	4	18	10	275	14	150	6	9	1	20	493	2955	13	48	112	549
Venejan	13	512	4	105	9	45	25	687	34	374	15	21	2	90	354	2124	49	186	70	343
somme	184	7170	88	2307	22	110	86	2326	81	882	35	50	4	150	7014	42084	1796	6825	301	1475

Les communes dont le nom est précédé du symbole « ½ » correspondent aux territoires qui ne sont inclus que pour moitié dans la zone des 10 km. Toutes les données agricoles correspondant à ces communes ont donc été divisées par 2.

### 3.3.2. La Hague

Les cultures à La Hague sont principalement destinées à la consommation animale. Il s'agit de cultures d'orge, de maïs ensilage, d'avoine fourragère et de prairies. Le détail des surfaces de production par commune est présenté dans le tableau 2 ainsi que les tonnages estimés en utilisant les valeurs de l'annexe 3. Le blé tendre est destiné à la consommation humaine. Les valeurs du tableau 2 sont tirées directement du recensement général de l'agriculture (RGA) de 2000 pour les prairies permanentes (= « superficie toujours en herbe » du RGA), le blé tendre, l'orge (= « orge et escourgeon » du RGA) et le maïs ensilage (= « maïs fourrage et ensilage » du RGA). Pour les prairies temporaires, la superficie est obtenue à partir de la différence entre la « superficie fourragère principale » du RGA et les prairies permanentes. Pour l'avoine, on a considéré que les « céréales » du RGA, autres que le blé tendre et l'ogre, étaient de l'avoine.

Tableau 2 : Productions végétales dans la zone des 10 km autour du site de La Hague (à partir des données du RGA 2000)

Commune	Prairies permanentes		Prairies temporaires		Blé tendre		Orge		Maïs ensilage		Avoine	
	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t	ha	t
Auderville	211	1392,6	3	21,9	8	55,2					4	18
Beaumont	326	2151,6	44	321,2	28	193,2	9	53,1	60	780	12	54
Biville	344	2270,4	25	182,5	37	255,3	5	29,5	63	819	17	76,5
Branville-Hague	168	1108,8	92	671,6	18	124,2			40	520	6	27
Digulleville	199	1313,4	79	576,7	32	220,8	10	59	54	702		
Eculleville	103	679,8	30	219	5	34,5	5	29,5	24	312	5	22,5
Gréville-Hague	336	2217,6	165	1204,5	17	117,3			71	923	55	247,5
Herqueville	59	389,4	27	197,1	4	27,6	5	29,5				
Jobourg	747	4930,2	100	730	31	213,9	27	159,3	64	832	8	36
Omonville-la-Petite	141	930,6	159	1160,7	10	69	5	29,5	10	130	20	90
Omonville-la-Roque	192	1267,2	92	671,6	50	345	10	59	30	390	30	135
1/2 Sainte-Croix-Hague	241	1587,3	61	441,65	28	193,2	7	38,35	63	812,5	5	22,5
Saint-Germain-des-Vaux	450	2970	42	306,6	19	131,1	9	53,1	68	884	1	4,5
1/2 Urville-Nacqueville	176	1158,3	48	350,4	21	141,45	18	106,2	61	786,5	5	22,5
Vauville	451	2976,6	127	927,1	25	172,5	12	70,8	38	494	12	54
somme	4143	27344	1094	7983	333	2294	122	717	645	8385	180	810

### 3.4. Productions animales

Pour les deux sites, les animaux d'élevage sont supposés intégralement nourris à partir des productions végétales de la zone des 10 km.

#### 3.4.1. Marcoule

Les productions animales à Marcoule sont les œufs, le lait de chèvre, la viande d'agneau, la viande de mouton et le miel (Tableau 3).

La production de miel, relativement faible, n'a pas été prise en compte dans la suite de cette étude. Les données du tableau 3 pour les ruches sont directement issues du RGA 2000.

Pour les œufs, nous avons multiplié les effectifs de volailles du RGA par le taux de production de 300 œufs par animal et par an (Larousse Agricole 2002). Par la suite, pour les calculs des transferts, nous avons considéré 17 œufs par kg (environ 60 g par œuf).

Pour le lait de chèvre, nous avons multiplié les effectifs de « caprins » du RGA par le taux de production de 760 kg de lait par animal et par an (Larousse Agricole 2002).

Pour la viande d'agneau et de mouton, nous avons considéré un agnelage par an pour chaque « brebis mère » du RGA et un poids de carcasse de 20 kg pour l'agneau (Larousse Agricole 2002 - valeur moyenne pour l'agneau gris, poids de la carcasse considéré comme ½ du poids vif) et un poids de carcasse de 22,5 kg pour le mouton (= « ovins » du RGA) (Larousse Agricole 2002 - valeur moyenne).

Les porcins, très faiblement représentés (effectif de 4 à Orange), ont été négligés.

Tableau 3 : Productions animales dans la zone des 10 km autour du site de Marcoule (à partir des données RGA 2000)

Commune	Ruche effectif	Œufs		Lait de chèvre t	Agneau t	Mouton t
		nombre	t			
Bagnols-sur-Ceze		21600	1,3			
Caderousse		92400	5,4			
Chusclan		30000	1,8			
Codolet		7200	0,4			
Laudun		159900	9,4	66		
Montfaucon		15000	0,9			
Mornas		155100	9,1			
1/2 Orange	38	250950	14,8	44	9	5
Orsan						
Piolenc	23	4151100	244,2			
Saint-Etienne-des-Sorts		17100	1,0			
Saint-Génies-de-Comolas		30000	1,8			
1/2 Saint-Laurent		6300	0,4			
Saint-Nazaire		15000	0,9			
1/2 Saint-Paul		4500	0,3			
1/2 Saint-Victor		6750	0,4			
1/2 Tresques		10950	0,6			
Venejan		21300	1,3			
somme	61	4995150	294	110	9	5

### 3.4.2. La Hague

A La Hague, les produits animaux sont le lait de vache, les œufs, le porc et l'agneau (Tableau 4).

Pour le lait de vache, nous avons multiplié les effectifs de vaches laitières (= « total vaches » du RGA moins l'effectif des « vaches normandes » moins l'effectif des « vaches nourrices ») par le taux de production des vaches Holstein, à savoir 5800 litres de lait par animal et par an (Agreste-Normandie 2003) et l'effectif des « vaches normandes » par le taux de production des vaches normandes, à savoir 4030 litres de lait par animal et par an (Agreste-Normandie 2003). Nous avons considéré que les « vaches nourrices » du RGA correspondaient uniquement au renouvellement du troupeau laitier et nous avons donc négligé la production de viande de bœuf.

Pour les œufs, nous avons multiplié les effectifs de volailles du RGA par le taux de production de 300 œufs par animal et par an (Larousse Agricole 2002). Les volailles sont toutes considérées comme des volailles pondeuses. Par la suite, pour les calculs des transferts, nous avons considéré 17 œufs par kg.

Pour le porc, nous avons considéré un poids de carcasse de 100 kg (Larousse Agricole 2002 - valeur moyenne pour le porc charcutier).

Pour la viande d'agneau, nous avons considéré un agnelage par an pour chaque « brebis mère » du RGA et un poids de carcasse de 20 kg pour l'agneau (Larousse Agricole 2002 - valeur moyenne pour l'agneau gris, poids de la carcasse considéré comme ½ du poids vif).

Tableau 4 : Productions animales dans la zone des 10 km autour du site de La Hague (à partir des données RGA 2000)

Commune	Lait de vache t	Œufs		Agneau t	Porc t
		nombre	t		
Auderville	274	44700	2,6	1	
Beaumont	1173	39000	2,3	3	
Biville	915	40800	2,4	5	
Branville-Hague	1092	6900	0,4	1	
Digulleville	1165	30000	1,8	1	
Eculleville	510	97800	5,8		
Gréville-Hague	1753	46200	2,7	7	
Herqueville	203	23400	1,4	1	
Jobourg	1685	124500	7,3	5	1
Omonville-la-Petite	883	20400	1,2	2	0,1
Omonville-la-Roque	0	30000	1,8	2	
1/2 Sainte-Croix-Hague	985	36000	2,1	2	
Saint-Germain-des-Vaux	1357	117300	6,9	3	10
1/2 Urville-Nacqueville	1071	12150	0,7	1	
Vauville	1426	103800	6,1	6	
somme	14492	772950	45	41	11

### 3.5. Bilan

La figure 3 présente la carte comparée des deux environnements agricoles. Elle illustre le choix de prendre en compte dans cette étude une grande diversité des productions agricoles sur les deux sites afin d'étudier l'influence de ses différences d'orientation agricole sur la sensibilité du territoire.

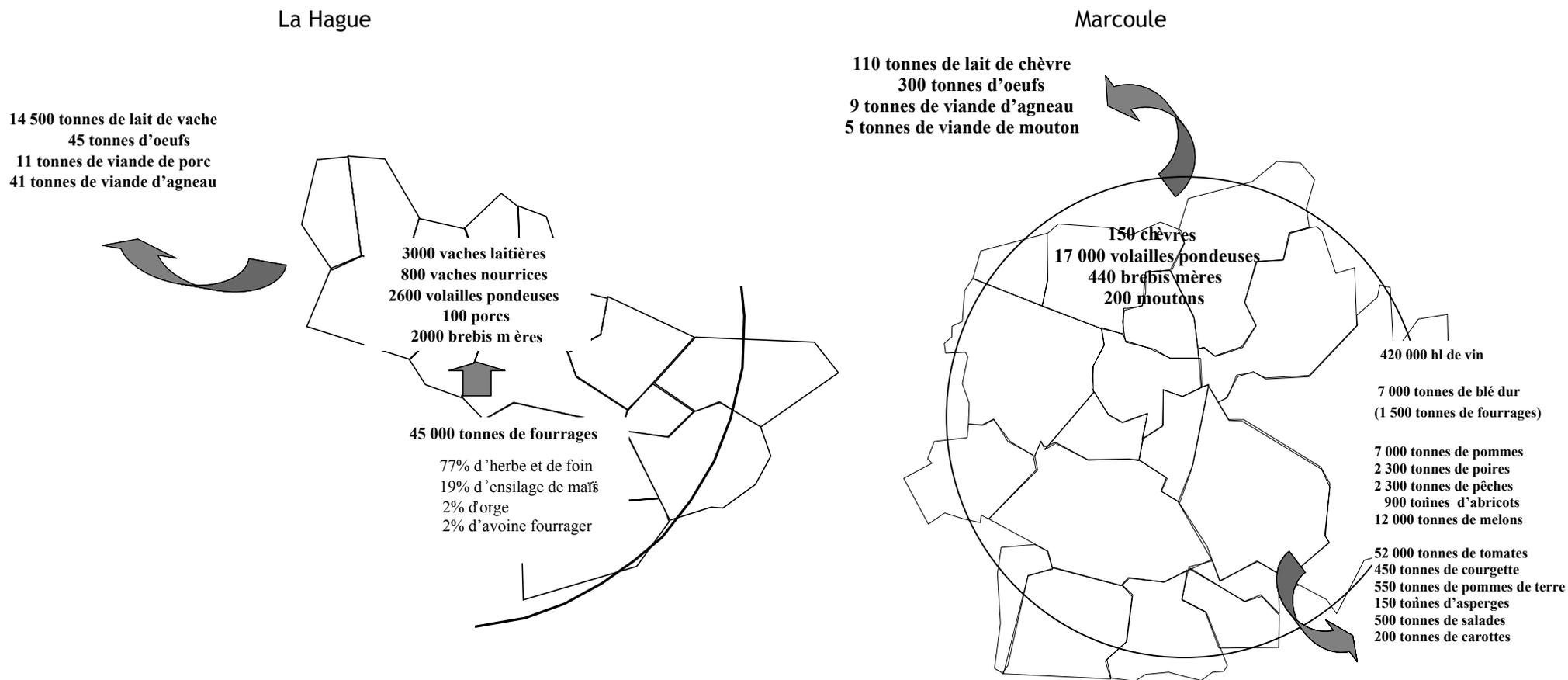


Figure 3 : Estimation des productions agricoles à La Hague et à Marcoule à partir des données du RGA de 2000 et des rendements régionaux en 2002

## 4. Résultats des calculs d'activités déposées sur les sols agricoles et d'activités dans les productions agricoles

### 4.1. Dépôt

#### 4.1.1. Activités totales (Bq)

Les activités totales (Bq) déposées en moyenne sur chaque commune sont présentées pour le site de La Hague (Figure 4a) et pour le site de Marcoule (Figure 4b). Il s'agit des débits de dépôts issus de FOCON96 multipliés par une durée de un an et par la superficie de la commune. Le code couleur permet d'identifier les communes où l'activité déposée est supérieure à  $4,5 \cdot 10^7$  Bq (en rose), les communes où l'activité déposée est comprise entre  $10^7$  Bq et  $4,5 \cdot 10^7$  Bq (en orange) et les communes où l'activité déposée est inférieure à  $10^7$  Bq (en jaune).

A La Hague (Figure 4a), les activités déposées dans un rayon de 10 km ne représentent que 3% du rejet initial sur les sols et 7% en mer. A Marcoule (Figure 4b), les activités déposées sur les sols représentent 8% du rejet initial. On remarque que les conditions météorologiques du site de La Hague (vents fréquents mais faibles, directions multiples) conduisent à ce que 10% du rejet soient déposés dans un rayon de 10 km. Sur le site de Marcoule, avec des vents fréquents et forts dans une direction unique la fraction déposée dans la zone des 10 km est de 8%. L'influence de la rose des vents des deux sites est finalement relativement faible et ne joue que sur 2% du rejet initial. Par contre, la topographie, prise ici en compte par la présence de la mer est importante puisque sur les 10% déposés dans la zone des 10 km autour du site de La Hague, 7% sont déposés sur la mer et ne sont donc plus disponibles directement pour les transferts aux productions agricoles.

Les communes touchées par des activités supérieures à  $5 \cdot 10^7$  Bq sont plus nombreuses à Marcoule du fait de l'existence d'une direction prédominante de dispersion atmosphérique et du fait des territoires communaux qui sont globalement plus étendus que ceux de La Hague. A Marcoule, les activités déposées supérieures ou sensiblement égales à  $5 \cdot 10^7$  Bq sont localisées dans les communes de Codolet ( $2,18 \cdot 10^8$  Bq), Caderousse ( $9,5 \cdot 10^7$  Bq), St Laurent ( $5,0 \cdot 10^7$  Bq), Chusclan ( $5,0 \cdot 10^7$  Bq) et Laudun ( $4,9 \cdot 10^7$  Bq). A La Hague, seule la commune de Gréville-Hague est soumise à un dépôt proche de  $5 \cdot 10^7$  Bq.

#### 4.1.2. Activités surfaciques (Bq.m<sup>-2</sup>)

Si l'on s'intéresse aux densités de dépôt en Bq.m<sup>-2</sup>, la variabilité entre les communes peut atteindre un facteur 100 pour les deux sites : [0,5 ; 42] pour le site de Marcoule et [0,02 ; 6] pour le site de La Hague. De manière générale, les flux déposés sont plus faibles dans l'environnement de La Hague que dans celui de Marcoule, du fait de la répartition plus homogène des vents.

#### 4.1.3. Bilan pour SENSIB

Les différences des roses des vents sont importantes entre les deux régions mais leur effet est finalement relativement faible sur l'activité totale déposée au voisinage du site. Ce point mériterait d'être confirmé/infirmer à l'échelle du territoire français en recensant l'ensemble des conditions météorologiques (vents et pluies) que l'on peut rencontrer autour des sites d'intérêt. L'effet des conditions météorologiques est par contre plus sensible lorsque l'on recherche l'existence de communes plus fortement exposées. La généralisation de l'étude des roses des vents à tous les sites nucléaires français est en cours afin de disposer d'éléments sur la gamme de variabilité des densités de dépôt, à l'échelle du territoire français.

La Hague

Marcoule

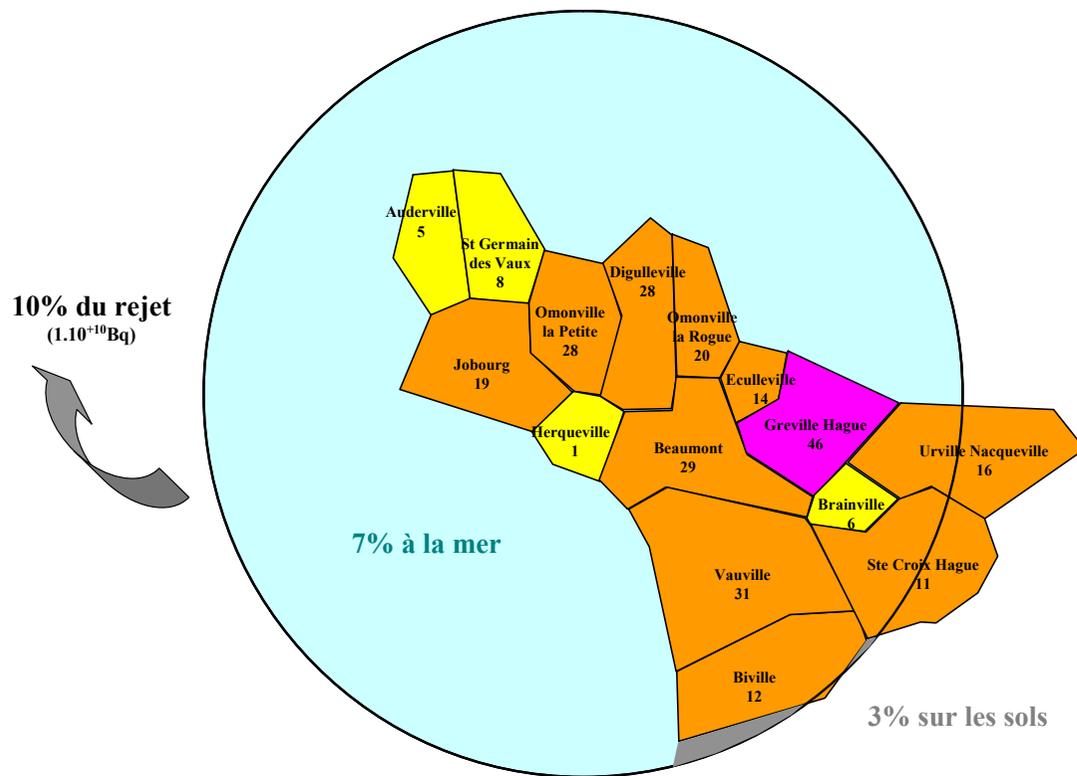


Fig. 4a

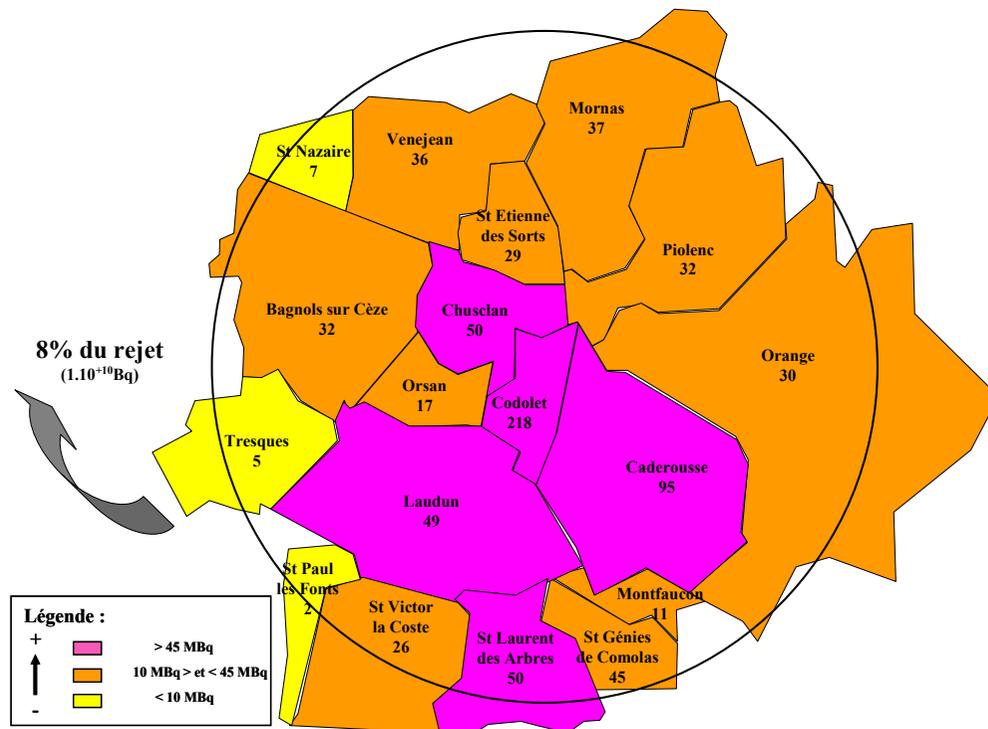


Fig. 4b

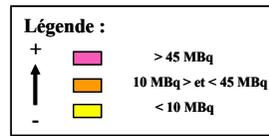


Figure 4 : Répartition des activités totales (MBq) dans un rayon de 10 km autour des sites de Marcoule (b) et La Hague (a)

## 4.2. Productions végétales

### 4.2.1. Activités totales (Bq)

L'activité globale contenue dans les productions végétales produites sur les deux sites est respectivement de 1,7 MBq de césium 137 pour le site de Marcoule et 8,6 MBq pour le site de La Hague (Tableau 5). Pour le cobalt 60, ces valeurs sont respectivement de 0,9 MBq et 4,3 MBq. Pour le strontium 90, l'activité totale sur le site de La Hague est de 5 MBq, équivalente à celle du cobalt. Par contre, pour le site de Marcoule, l'activité totale en strontium 90 est de 0,3 MBq, soit 3 fois moins qu'en cobalt 60 et 5 à 6 fois moins qu'en césium 137 car la translocation diminue les transferts de strontium 90 vers les fruits et les légumes.

Pour l'iode 131, aux phénomènes de transfert se superpose un effet de la décroissance radioactive qui n'est plus négligeable. Les activités totales sont moindres que pour les autres radionucléides, à l'exception du cas du strontium 90 sur le site de Marcoule où l'activité totale est du même ordre de grandeur entre l'iode 131 et le strontium 90. En effet, la forte mobilité de l'iode 131 vers les productions végétales compense en partie les pertes par décroissance radioactive et conduit alors à un résultat équivalent à celui du strontium 90 pour lequel la faible valeur d'activité totale est due à un phénomène différent, la moindre mobilité lors de la translocation.

Tableau 5 : Activités totales contenues dans les productions végétales d'une année sur les 2 sites (en MBq)

	Site de La Hague	Site de Marcoule
Césium 137	8,6	1,7
Cobalt 60	4,3	0,9
Strontium 90	5,0	0,3
Iode 131	1,5	0,3

L'ensemble de ces valeurs montre aussi, du fait qu'elles sont systématiquement plus élevées pour le site de La Hague que pour celui de Marcoule, que la sensibilité des productions végétales fourragères (prairies du site de La Hague) est plus importante pour ces radionucléides que celles des productions végétales destinées à l'alimentation humaine (vigne<sup>2</sup> qui, à Marcoule, contribue pour environ 70% à l'activité totale des productions végétales). En effet, en termes d'activité totale, malgré un dépôt au sol plus faible à La Hague qu'à Marcoule, l'activité totale des productions végétales dans un rayon de 10 km du site de La Hague est finalement supérieure à celle du site de Marcoule pour le césium 137, le cobalt 60, le strontium 90 et l'iode 131.

### 4.2.2. Activités massiques (Bq.kg<sup>-1</sup>)

Si l'on s'intéresse maintenant aux activités massiques moyennes sur la zone des 10 km (Bq.kg<sup>-1</sup>), dans le cas de La Hague, les différences d'activité entre les types de prairies sont faibles (par exemple, pour le césium 137 : 0,22 Bq.kg<sup>-1</sup> pour les prairies permanentes, 0,20 Bq.kg<sup>-1</sup> pour les prairies temporaires et 0,14 Bq.kg<sup>-1</sup> pour le maïs ensilage). Il y a peu de différences entre les types de fourrages car la modélisation des transferts est la même

<sup>2</sup> Le terme vigne est ici employé pour représenter la production de vin.

en termes d'interception et le rendement moyen annuel est peu différent entre les prairies permanentes, les prairies temporaires et le maïs ensilage (respectivement 0,66 kg.m<sup>-2</sup>, 0,73 kg.m<sup>-2</sup> et 1,3 kg.m<sup>-2</sup>). Dans le cas de Marcoule, on observe des différences d'activités massiques plus importantes entre les productions fruitières et légumières (colonne de chiffres de gauche de la figure 5) car les différences des rendements (et dans une moindre mesure des temps de croissance) sont plus marquées entre les cultures (facteur 20 par exemple entre le rendement de cerises et celui de tomates sous serres).

L'échelle de sensibilité pour les légumes fruits qui se dégage de cette étude est présentée sur la figure 5. On remarque que les productions végétales les plus sensibles sont celles pour lesquelles le rendement de culture est le plus faible alors qu'à l'inverse, les moins sensibles sont les cultures de plus fort rendement, en raison d'un effet de dilution de la radioactivité dans la masse de végétal produite.

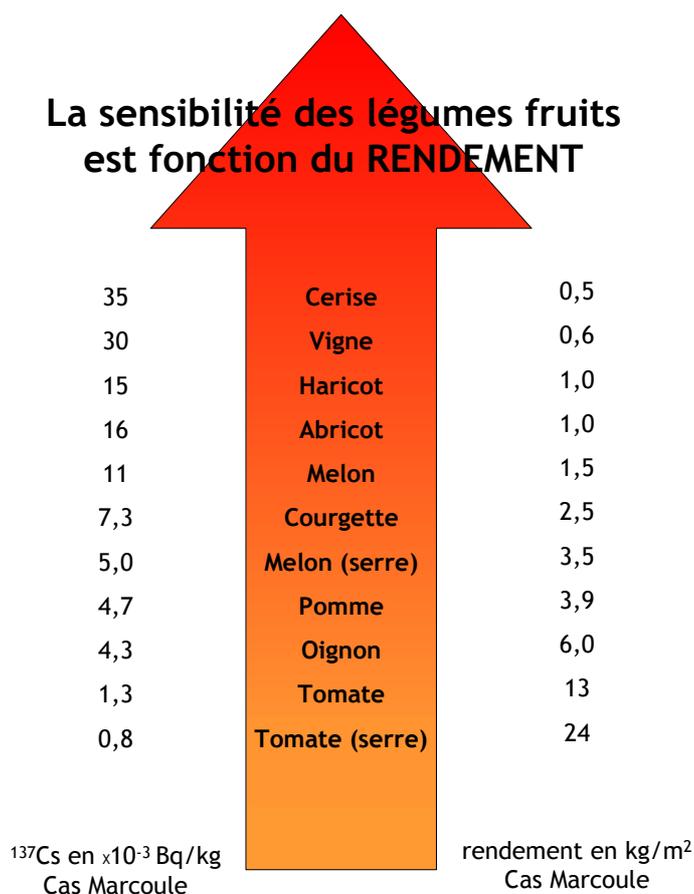


Figure 5 : Echelle de sensibilité des légumes fruits dérivée du cas du <sup>137</sup>Cs à Marcoule

Des échelles du même type pourraient être établies pour les légumes feuilles et les légumes racines si de nombreuses variétés entrant dans cette catégorie étaient cultivées à Marcoule. Les données des statistiques agricoles annuelles d'Agreste montrent qu'il y a essentiellement des salades et des choux pour les légumes feuilles et des pommes de terre et des carottes pour les légumes racines. La prise en compte de ces légumes nous a permis de caler les échelles de sensibilité des légumes feuilles et des légumes racines par rapport à celle des légumes fruits mais les bornes des échelles pour ces catégories (Figure 5) seraient à calculer pour une généralisation dans différentes zones du territoire français. On retrouve ici très logiquement la hiérarchisation habituelle des activités massiques des

végétaux relativement à un transfert foliaire, i.e., légumes feuilles > légumes racines > légumes fruits.

### La sensibilité des LEGUMES

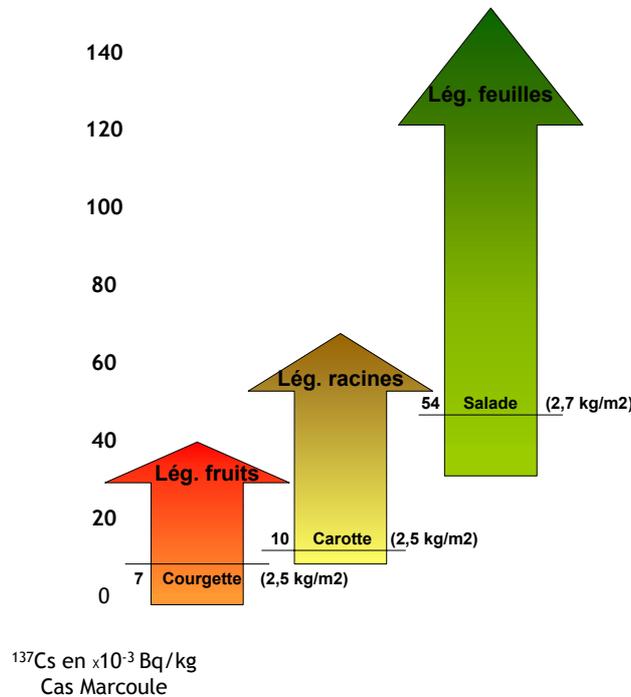


Figure 5 : Echelle de sensibilité des légumes dérivée du cas du <sup>137</sup>Cs à Marcoule

#### 4.2.3. Bilan pour SENSIB

La sensibilité des productions végétales est déterminée conjointement par les valeurs des paramètres radioécologiques et agronomiques (Tableau 6).

Pour les paramètres radioécologiques, c'est le facteur de translocation qui influence le plus le niveau d'activité que l'on va obtenir dans le végétal car la gamme de valeurs pour ce paramètre est plus large que pour les autres paramètres radioécologiques (captation et décroissance biomécanique). La variabilité peut effectivement atteindre un facteur 10 entre les végétaux sans translocation : fourrages et légumes feuilles et ceux pour lesquels il y a translocation : légumes fruits, légumes racines et grain.

Cet effet du facteur de translocation peut éventuellement être amplifié d'un facteur 5 à 10 si l'on prend en compte l'effet des différences de transfert entre les radionucléides. Ainsi, on observe un facteur de l'ordre de 50 entre l'activité massique ( $5,4 \cdot 10^{-2} \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) que l'on obtient à Marcoule dans une salade pour le césium 137, (radionucléide dit « mobile » et absence de translocation car la partie consommée est celle qui a reçu le dépôt) et l'activité dans une courgette ( $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Bq.kg}^{-1}$ ) pour le strontium 90, (radionucléide dit « peu mobile » et prise en compte de la translocation depuis le feuillage de la plante jusqu'à la partie consommée).

La captation influence bien moins la sensibilité que la translocation car la variation entre les valeurs de ce paramètre pour les différentes cultures est seulement d'un facteur 2, et

ce uniquement pour un dépôt par temps sec. La captation par temps humide repose sur une valeur unique du rapport de captation qui ne dépend pas du végétal.

Pour les paramètres agronomiques, c'est le rendement (facteur d'écart qui peut atteindre 20 entre une mâche et une tomate sous serre) qui constitue le paramètre qui influence le plus les transferts vers le végétal car la variabilité des temps de croissance est moindre (facteur de 10 au maximum) et surtout n'est influente que pendant la durée d'une période biomécanique (de 9 à 24 jours selon les végétaux). Au delà, l'influence de la variabilité du temps de croissance est atténuée par la décroissance biologique qui contraint la diminution des transferts par décroissance physique du radionucléide.

L'effet de la « mobilité » du radionucléide est finalement relativement faible puisque dans le modèle utilisé, il ne joue que sur la translocation et donc une différence n'apparaît qu'entre les radionucléides mobiles et peu mobiles et entre le groupe des légumes feuilles/fourrages et celui des légumes fruits/légumes racines/grains. A l'intérieur de ces catégories, il n'y a pas d'effet dû à la mobilité des radionucléides considérés ici.

Tableau 6 : Influence des différents paramètres sur la sensibilité radioécologique des productions végétales

		Gamme de valeurs	Activité massique Bq/kg	Activité totale Bq
PARAMETRES RADIOECOLOGIQUES	rapport de captation	0,5 à 0,9	↑	↑
	facteur de translocation	0,02 à 1	↑	↑
	décroissance biologique	9 à 24 jours	effet faible	
PARAMETRES AGRONOMIQUES	rendement	0,4 à 24 kg/m <sup>2</sup>	↓	→
	temps de croissance	50 à 280 jours	↑	↑

Dans l'état actuel des connaissances et de l'utilisation de la modélisation, les deux facteurs de sensibilité principaux lors de contamination atmosphérique chronique par voie foliaire des productions végétales sont la translocation et le rendement. Les productions végétales les plus sensibles sont donc les légumes-feuilles (de type mâche, laitue, persil ou épinard) et les fourrages dont les rendements sont les plus faibles, à savoir les prairies extensives. La valeur du rendement n'est influente dans les calculs de transfert vers les végétaux qu'en termes d'activité massique car pour évaluer l'activité totale en Bq, l'activité massique est multipliée par le rendement de la parcelle et donc le rendement apparaît au numérateur et au dénominateur de l'équation de calcul et sa variabilité n'a en fin de compte pas d'influence.

Ces résultats pourront être généralisés à l'ensemble des productions végétales du territoire français moyennant une étude de la variabilité des rendements élargie à l'ensemble des productions végétales françaises.

### 4.3. Productions animales

#### 4.3.1. Activités totales (Bq)

L'activité globale contenue dans les productions animales produites sur les deux sites est respectivement de 0,9 MBq de césium 137 pour le site de La Hague et 0,01 MBq pour le site de Marcoule (Tableau 7). Cet écart important vient de la faiblesse des productions

animales du site de Marcoule dont l'agriculture est orientée vers la production fruitière et légumière par rapport à celui de La Hague dont l'agriculture est orientée vers la production laitière.

Pour le cobalt 60, on retrouve cet écart avec des valeurs respectivement de 0,2 MBq pour le site de La Hague et 0,0007 MBq pour le site de Marcoule.

Les écarts entre les activités totales pour les productions animales entre le césium 137 et le cobalt 60 (facteur 4 à La Hague et facteur 14 à Marcoule) illustrent la différence de mobilité globale de ces deux radionucléides vers les productions animales.

Pour le strontium 90, l'activité totale des productions animales pour le site de La Hague est de 0,2 MBq et de 0,0007 MBq pour le site de Marcoule. Ces valeurs sont équivalentes à celles du cobalt 60.

Pour l'iode 131, l'influence de la décroissance radioactive plus rapide est compensée par un transfert plus important dans le lait et finalement, l'activité globale sur le site de La Hague (0,2 MBq) est du même ordre de grandeur que pour le cobalt 60 et pour le strontium 90. Pour le site de Marcoule, l'activité totale des productions animales (0,01 MBq) est même plus importante que pour le cobalt 60 et le strontium 90 du fait du transfert plus important de l'iode vers les œufs et le lait de chèvre.

Tableau 7 : Activités totales contenues dans les productions animales des 2 sites (en MBq)

	Site de La Hague	Site de Marcoule
Césium 137	0,9	0,01
Cobalt 60	0,2	0,0007
Strontium 90	0,2	0,0007
Iode 131	0,2	0,01

#### 4.3.2. Activités massiques (Bq.kg<sup>-1</sup>)

Dans le cas du site de La Hague, on remarque des différences entre les activités massiques des productions animales (Tableau 8) qui n'apparaissent pas à l'examen de l'activité totale car la contribution très importante en tonnage de la production laitière écrasait les autres contributions. En termes d'activités massiques dans les produits animaux du site de La Hague, on remarque notamment la mobilité plus importante du césium 137 vers l'ensemble des productions animales étudiées par rapport aux autres radionucléides. Pour les autres radionucléides, le lait de vache et la viande d'agneau sont en général, les produits animaux les plus sensibles en termes d'activités massiques. Ce sont les productions issues d'animaux nourris par des fourrages alors que le porc et la volaille sont supposés nourris à partir de maïs grain. Le cas du porc constitue parfois un cas intermédiaire car les valeurs des facteurs de transfert de la littérature peuvent être importantes (cas du cobalt) et conduisent alors à des activités massiques relativement importantes même si cet animal est supposé nourri exclusivement à partir de maïs grain local.

Tableau 8 : Activités massiques des productions animales du site de La Hague (en Bq.l<sup>-1</sup> ou Bq.kg<sup>-1</sup>)

	Lait de vache	Agneau	Porc	Œufs
Césium 137	0,06	0,8	0,03	2.10 <sup>-3</sup>
Cobalt 60	0,01	9.10 <sup>-3</sup>	8.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-6</sup>
Strontium 90	0,01	3.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-5</sup>	7.10 <sup>-5</sup>
Iode 131	0,01	0,01	6.10 <sup>-5</sup>	2.10 <sup>-3</sup>

#### 4.3.3. Bilan pour SENSIB

La sensibilité des productions animales est déterminée conjointement par la ration de fourrages contaminés consommée et par la valeur du facteur de transfert. Les productions animales seront plus sensibles en termes d'activité massique si la valeur du facteur de transfert au lait ou à la viande est importante et/ou si les végétaux de la ration consommée sont eux aussi sensibles en termes de transfert. Ainsi on observe dans le cas du site de La Hague que les animaux qui pâturent produisent des viandes et lait dont l'activité massique est plus importante que pour les animaux nourris au grain (cas du lait de vache et de la viande d'agneau) alors que pour la viande de porc, l'activité massique plus importante est due à la forte valeur du facteur de transfert. Les valeurs de ce dernier paramètre peuvent être très variables selon le type de productions animales et selon le radionucléide considéré ; la mobilité vers une production animale ne préjuge pas forcément de la mobilité vers une autre. Cette conclusion est relativement étonnante, notamment lorsqu'on compare les viandes entre elles car si on peut comprendre que pour la production de lait ou celle d'œufs, le métabolisme mis en œuvre soit différent, pour les viandes on aurait pu s'attendre à des similitudes. Il faut cependant prendre avec prudence cette conclusion car si des valeurs pour le facteur de transfert sont abondamment citées pour certains produits (lait de vache) et certains radionucléides (césium, strontium), elles ne signifient pas forcément que la connaissance en soit très précise. Par ailleurs, beaucoup moins de valeurs sont disponibles dès lors que l'on s'intéresse à d'autres types de produits et/ou de radionucléides.

#### 4.4. Sensibilité globale

La sensibilité globale de l'environnement agricole des deux sites peut finalement être comparée au travers de l'activité totale (Bq) contenue dans l'ensemble des productions de la zone des 10 km autour de chacun des deux sites (productions végétales + productions animales). Il apparaît alors que l'environnement agricole de Marcoule « produit » environ deux fois plus de becquerels de césium 137 que celui de La Hague et 4 fois plus de cobalt 60. Pour ces deux radionucléides, on retrouve globalement l'écart observé en termes d'activité déposée sur la zone des 10 km qui était d'un facteur environ 3.

Par contre, pour le strontium 90 et pour l'iode 131, l'activité totale des productions agricoles des deux sites est équivalente (Tableau 9). Ces conclusions sont finalement différentes des conclusions que l'on a pu observer précédemment lorsque l'on s'intéresse aux compartiments végétal ou animal de façon distincte car s'ajoute la notion d'autoconsommation des fourrages sur la zone des 10 km. La prise en compte de cette autoconsommation conduit à ne pas considérer l'activité totale produite par les végétaux du site de La Hague puisqu'ils sont autoconsommés dans les 10 km et cet effet conduit à

une diminution importante de l'activité globale de l'ensemble des productions agricoles du site de La Hague<sup>3</sup>.

Finalement, il apparaît que les différences de sensibilité en termes d'activité totale cumulée sur toutes les productions agricoles sont relativement faibles. Cette conclusion provient de la prise en compte combinée de l'ensemble des facteurs de sensibilité qui conduit à des phénomènes de compensation. Ainsi, la plus grande sensibilité des productions végétales (prairies par rapport à fruits et légumes) est compensée par le fait qu'à La Hague, ces productions végétales sont autoconsommées sur la zone autour pour obtenir les productions animales et que le transfert des radionucléides des productions végétales aux productions animales entraîne une diminution globale de l'activité totale.

Tableau 9 : Transfert de l'activité totale depuis le rejet jusqu'aux productions agricoles pour les deux sites en Bq (et en % du rejet) pour un rejet atmosphérique théorique de  $10^{10}$  Bq pendant 1 an et un transfert limité à la voie foliaire

		Rejet	Dépôt	Activité totale dans les productions végétales	Activité totale dans les productions animales	Activité totale de l'ensemble des productions agricoles
<sup>137</sup> Cs	Marcoule	10 <sup>10</sup>	8.10 <sup>8</sup> (8%)	1,7.10 <sup>6</sup> (0,017 %)	□	1,7.10 <sup>6</sup> (0,017 %)
	La Hague		3.10 <sup>8</sup> (3%)	(8,6.10 <sup>6</sup> )	0,9.10 <sup>6</sup> (0,009 %)	0,9.10 <sup>6</sup> (0,009 %)
<sup>60</sup> Co	Marcoule		8.10 <sup>8</sup> (8%)	0,9.10 <sup>6</sup> (0,009 %)	□	0,9.10 <sup>6</sup> (0,009 %)
	La Hague		3.10 <sup>8</sup> (3%)	(4,3.10 <sup>6</sup> )	0,2.10 <sup>6</sup> (0,002 %)	0,2.10 <sup>6</sup> (0,002 %)
<sup>90</sup> Sr	Marcoule		8.10 <sup>8</sup> (8%)	0,3.10 <sup>6</sup> (0,003 %)	□	0,3.10 <sup>6</sup> (0,003 %)
	La Hague		3.10 <sup>8</sup> (3%)	(5.10 <sup>6</sup> )	0,2.10 <sup>6</sup> (0,002 %)	0,2.10 <sup>6</sup> (0,002 %)
<sup>131</sup> I	Marcoule		8.10 <sup>8</sup> (8%)	0,3.10 <sup>6</sup> (0,003 %)	□	0,3.10 <sup>6</sup> (0,003 %)
	La Hague		3.10 <sup>8</sup> (3%)	(1,5.10 <sup>6</sup> )	0,2.10 <sup>6</sup> (0,002 %)	0,2.10 <sup>6</sup> (0,002 %)

Les activités entre parenthèses sont supposées autoconsommées par les animaux élevés dans la zone des 10km

Enfin, si l'on multiplie la dernière colonne du tableau 9 par les coefficients de dose efficace par ingestion, spécifiques de chaque radionucléide (Directive 96/29/Euratom - valeurs pour l'adulte)<sup>4</sup> et en considérant une ingestion immédiate dès la production à maturité, on peut alors sommer les contributions des radionucléides pour obtenir un indicateur unique pour chaque site. Cet indicateur est alors respectivement de  $4.10^{-2}$  pour le site de Marcoule et  $2.10^{-2}$  pour La Hague si les proportions du rejet sont les mêmes pour chaque radionucléide. Il apparaît donc que si l'on rapporte la sensibilité globale de l'environnement agricole à un critère dosimétrique, pour les quatre radionucléides considérés, le site de Marcoule apparaît comme deux fois plus sensible que celui de La

<sup>3</sup> La seule production végétale du site de La Hague non autoconsommée est le blé tendre qui est destiné à l'alimentation humaine mais l'activité totale correspondante est faible (inférieure à 0,1 MBq quel que soit le radionucléide) et n'a donc pas été prise en compte pour le calcul global.

<sup>4</sup> Respectivement  $1,3.10^{-8}$  Sv.Bq<sup>-1</sup> pour le césium 137,  $3,4.10^{-9}$  Sv.Bq<sup>-1</sup> pour le cobalt 60,  $2,8.10^{-8}$  Sv.Bq<sup>-1</sup> pour le strontium 90 et  $2,2.10^{-8}$  Sv.Bq<sup>-1</sup> pour l'iode 131.

Hague. Malgré la grande diversité climatique, topographique et agricole des deux sites, cette différence globale relativement faible illustre une fois de plus les phénomènes de compensation des différents facteurs de sensibilité que l'on pouvait déjà observer dans le paragraphe précédent sur la sensibilité globale. Ce travail pourrait par ailleurs être poursuivi en intégrant les différences de comportements alimentaires des populations périphériques des sites de La Hague et de Marcoule pour quantifier l'influence relative de facteurs de sensibilité anthropiques.

La traduction de ces résultats pour le projet SENSIB permet de proposer des voies d'identification des environnements agricoles les plus sensibles ou au contraire les moins sensibles et de quantifier les ordres de grandeur des différences d'activités résultantes dans ces environnements.

Si l'on cherche l'environnement agricole le plus sensible en termes de productions présentant les activités massives les plus importantes sur une zone de 10 km par contamination foliaire, il faudrait combiner les facteurs de sensibilité suivants :

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

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

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

On obtiendrait un facteur de l'ordre de 100 sur l'activité globale par rapport aux environnements agricoles les moins sensibles (diffusion atmosphérique forte, productions agricoles de fruits sous serre). Mais si la sensibilité de l'environnement agricole est plus faible, il est possible que la sensibilité par d'autres voies (par exemple par l'exposition directe par les sols) puisse être plus importante.

Ce cas concret permet de tirer des enseignements pour orienter les travaux plus généraux du projet SENSIB :

- la sensibilité des productions végétales exprimée par l'activité massique est fonction de la translocation et du rendement cultural,
- la sensibilité des productions animales exprimée par l'activité massique est fonction de la ration, du facteur de transfert et du pourcentage d'autoconsommation des fourrages,
- l'environnement agricole le plus sensible, en termes d'activité globale contenue dans les productions agricoles, répond aux caractéristiques suivantes : totalité de terres cultivées dans un rayon de 10 km, conditions de diffusion faible, productions agricoles principales de type prairies cultivées pour la production de fourrages non autoconsommés ou tous types de productions de légumes-feuilles,
- les radionucléides obéissent à différents types de comportements qui influent plus ou moins sur la sensibilité globale d'un environnement agricole.

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

## V. Conclusion

Cette étude a permis d'illustrer le concept de la sensibilité radioécologique des milieux agricoles telle qu'elle peut être appréhendée dans l'état actuel des pratiques à l'IRSN en termes de modélisation des transferts par contamination foliaire pour un rejet chronique. Certaines hypothèses simplificatrices ont été adoptées pour cette étude et constituent donc des perspectives pour élargir ce travail :

- par la prise en compte d'un rejet accidentel qui nécessiterait notamment d'affiner la modélisation pour tenir compte :
  - d'un spectre de rejet plus large,
  - de la date de l'accident,
  - des probabilités d'occurrence de différentes conditions climatiques,
- par la prise en compte de rejets chroniques pendant 30/40 ans pour rendre compte de la sensibilité d'un site sur la durée de vie d'une installation de type REP ce qui nécessiterait notamment de prendre en compte la contamination par voie racinaire,
- par la prise en compte de rejets chroniques sur des périodes très longues (scénarios d'exposition pour des installations de stockage) qui nécessiterait de tenir compte de la contamination par voie racinaire, du sous-sol et d'autres radionucléides (Pu, ...),
- par l'élargissement de la zone à un kilométrage à définir pour prendre en compte un pourcentage déterminé du rejet,
- par la prise en compte du milieu marin, des milieux semi-naturels, des milieux urbains, etc.
- par la prise en compte des facteurs de sensibilité anthropiques : densité de population, habitudes alimentaires.

## Bibliographie

Agreste, statistique agricole : [www.agreste.agriculture.gouv.fr/](http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/)

Agreste-Gard (2002) - Statistique agricole annuelle de 2002 pour le département du Gard.

Agreste (2004) - Conjoncture Fruits : Estimation de production d'abricots et de cerises au 1<sup>er</sup> juillet 2004

Agreste-Manche (2004a) - Données : Les pratiques culturales en 2001 sur les prairies. Numéro 48-1 février 2004.

Agreste-Manche (2004b) - Données : Les pratiques culturales en 2001 sur les maïs. Numéro 48-2 mars 2004.

Agreste-Manche (2004c) - Données : Les pratiques culturales en 2001 sur le blé tendre. Numéro 48-3 mars 2004.

Agreste-Normandie (2003) - Le bulletin Conjoncture : statistique Agricole Annuelle, 2003-2, décembre 2003.

Agreste (2006) - Conjoncture Fruits : Estimation de production de pêche au 1<sup>er</sup> septembre 2005, Numéro 5 - septembre 2005.

Deville-Cavelin G., Crabol B. et Monfort M. (1994) - Description du code COTRAM2 de calcul de coefficients de transfert atmosphérique moyens. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Département pour la Protection et les Etudes contre les Accidents. Note Technique SEAC/94/188.

INRA (2003) - Presse Info : PhénoClim : une base de données pour suivre l'impact du réchauffement climatique sur les arbres fruitiers et la vigne, septembre 2003.

IRSN (2001) - Identification et estimation des incertitudes associées aux évaluations de doses obtenues par le modèle mathématique du Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, rapport IPSN/DPRE/SERNAT 2001-13.

ITCF (2003) - Stades du blé - Edition 2003 - Paris

Larousse agricole (1981) - Direction de Jean-Michel Clément, 1207 p.

Larousse agricole (2002) - Direction de Marcel Mazoyer, Le monde paysan au XXI<sup>ème</sup> siècle, 767 p.

Mercat-Rommens C. et Renaud P. (2003) - Rapport de lancement du projet SENSIB, rapport IRSN/DEI/SESURE 2003-02.

Merle-Szeremeta A., Rommens C. (1999) - Description du calcul des activités dans les différents compartiments de l'environnement terrestre. Note technique IRSN/DPHD/SEGR/SAER n°99-35 et annexe GT3 du GRNC.

Météo-France (1996) - CD-Rom Le climat de la France.

Rommens C. (1997) - Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calculs des impacts dosimétriques. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Département de Protection de la Santé de l'homme et de Dosimétrie. Note technique SEGR/SAER/97 n°25 - indice 2.

Rommens C., Morin A., Merle-Szeremeta A. (1999) - Le modèle FOCON d'évaluation de l'impact dosimétrique des rejets radioactifs atmosphériques des installations nucléaires en fonctionnement normal. Radioprotection - vol 34, n°2, pp 195-209.

SERFEL - Calendrier de maturités des cerises à Saint-Gilles (30).

Soltner (1990) - Les grandes productions végétales. Collection des sciences et techniques agricoles. Saint-Gemme-sur-Loire. Angers.

## Annexe 1 : les équations de transfert aux productions végétales et animales

L'expression donnant la concentration dans les productions végétales est la suivante. Elle se décline pour le temps sec et le temps de pluie et les deux activités résultantes obtenues s'additionnent. Le temps de croissance correspond au temps de présence de la partie consommée, par exemple le délai entre la floraison et la récolte pour un fruit.

$$A_{feu} = R_c \cdot \frac{\Delta}{r} \cdot F_t \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_{bm} + \lambda_r) t_{veg}}}{\lambda_{bm} + \lambda_r}$$

$A_{feu}$  (Bq.kg<sup>-1</sup>frais) : activité massique dans les parties comestibles du végétal par transfert foliaire,

$\Delta$  (Bq.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>) : débit de dépôt ,

$r$  (kg frais.m<sup>-2</sup>) : rendement cultural,

$\lambda_{bm}$  (s<sup>-1</sup>) : constante de décroissance biomécanique,

$\lambda_r$  (s<sup>-1</sup>) : constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré,

$t_{veg}$  (s) : temps de croissance du végétal,

$F_t$  : facteur de translocation,

$R_c$  : rapport de captation.

L'expression donnant la concentration dans les productions animales est la suivante :

$$A_{ani} = \left[ \sum_{veg} A_{feu} \cdot Q_{veg} \cdot (1 - Ex) \right] \cdot F_{ani}$$

$A_{ani}$  (Bq.kg<sup>-1</sup>) : activité massique dans le produit animal,

$A_{feu}$  (Bq.kg<sup>-1</sup>) : activité massique dans le végétal consommé,

$Q_{veg}$  (kg.j<sup>-1</sup>) : consommation quotidienne de végétaux par l'animal,

$Ex$  : fraction exogène, c'est à dire fraction des aliments provenant de zones non affectées par les rejets considérés,

$F_{ani}$  (Bq.kg<sup>-1</sup> d'animal frais /Bq ingéré.j<sup>-1</sup>) : facteur de transfert au produit animal.

## Annexe 2 : les paramètres radioécologiques

	Légumes feuilles	Légumes fruits	Légumes racines	Céréales	Maïs ensilage	Maïs grain	herbe
Facteur de translocation (radionucléide mobile)	1	0,1	0,1	0,15	1	0,15	1
Facteur de translocation (radionucléide peu mobile)	1	0,02	0	0,02	1	0,02	1
Rapport de captation par temps sec	0,5	0,5	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7
Rapport de captation par temps humide	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Les radionucléides considérés comme mobiles dans les végétaux sont le césium, le cobalt et l'iode.

Périodes de décroissance biomécanique\* : 9 jours pour l'iode  
 24 jours pour le césium  
 14 jours pour les autres radionucléides

Facteurs de transfert aux produits d'origine animale\* (j.kg<sup>-1</sup> pour tout sauf le lait en j.l<sup>-1</sup>)

	Lait de vache	Lait de brebis	viande de mouton agneau	Viande porc	Œufs
Cobalt	2,00E-03	1,00E-02	1,00E-02	2,00E-01	1,00E-03
Césium	5,00E-03	6,00E-02	5,00E-01	4,00E-01	5,00E-01
Iode	5,00E-03	5,00E-01	5,00E-02	5,00E-03	3,00E+00
Strontium	2,00E-03	1,00E-02	3,00E-03	2,00E-03	3,00E-01

\* Valeurs issues de Rommens (1997)

## Annexe 3 : les principaux paramètres agronomiques

### Temps de croissance (jours)<sup>5</sup>

#### La Hague

Culture	Valeurs	Référence
Blé tendre	270	ITCF 2003
Orge d'hiver	250	Larousse Agricole 2002
Maïs ensilage	150	Moyenne des valeurs IRSN 2003
Maïs grain	165	Moyenne des valeurs IRSN 2001
Avoine fourrage	100	Larousse Agricole 2002

#### Marcoule

Culture	Valeurs	Référence
Asperge	240	Larousse Agricole 2002
Carotte	150	Moyenne des valeurs IRSN 2001
Chou	280	IRSN 2001
Courgette	110	Moyenne des valeurs IRSN 2001
Haricot	55	Larousse Agricole 2002 (moyenne zone méridionale)
Oignon	165	Moyenne des valeurs IRSN 2001 pour l'oignon de couleur
Pomme de terre	110	Larousse Agricole 2002 (primeur pleine terre)
Salade	50	Moyenne des valeurs IRSN 2001 pour la laitue
Tomate	80	Moyenne des valeurs IRSN 2001 pour la tomate précoce
Tomate sous serre	170	Maximum des valeurs IRSN 2001 car stratégie de culture longue
Abricot	100	Date de floraison INRA 2003 Date de récolte Agreste 2004
Cerise	90	Date de floraison INRA 2003 Date de récolte SERFEL
Melon plein champ	60	Larousse Agricole 2002
Melon sous serre	90	Larousse Agricole 2002
Pêche	135	Date de floraison fixée 1 <sup>er</sup> mars Date de récolte Agreste 2006
Pomme	150	Moyenne des valeurs Larousse Agricole 1981
Poire	120	Variété dominante Williams selon Agreste-Gard 2002 et temps de croissance selon Larousse Agricole 2002
Olive verte	135	Floraison mi-mai selon nos observations régionales Récolte en octobre selon Larousse Agricole 2002
Vigne	100	Larousse Agricole 1981

<sup>5</sup> Pour la végétation des prairies, le temps de croissance considéré est de 365 jours pour les deux sites (présence permanente de la partie foliaire consommée par l'animal).

Maïs grain	165	Moyenne des valeurs IRSN 2001
Blé dur	270	ITCF 2003

### Rendement (kg.m<sup>-2</sup> pour un an)

#### La Hague

Culture	Valeurs	Référence
Prairies permanentes	0,66	Agreste Manche 2004a
Prairies temporaires	0,73	Agreste Manche 2004a
Blé tendre	0,69	Agreste Manche 2004a
Orge d'hiver	0,59	Agreste Normandie 2003
Maïs ensilage	1,3	Agreste Manche 2004a
Maïs grain	0,90	Agreste Normandie 2003
Avoine fourrage	0,45	Agreste Normandie 2003

#### Marcoule

Culture	Valeurs	Référence
Asperge	0,37	Agreste Gard 2002
Carotte	2,49	Agreste Gard 2002
Chou	1,45	Agreste Gard 2002
Courgette	2,46	Agreste Gard 2002
Haricot	1	Agreste Gard 2002
Oignon	6	Agreste Gard 2002
Pomme de terre	2,61	Agreste Gard 2002
Salade	2,66	Agreste Gard 2002
Tomate	12,61	Agreste Gard 2002
Tomate sous serre	23,67	Agreste Gard 2002
Abricot	1,09	Agreste Gard 2002
Cerise	0,49	Agreste Gard 2002
Melon	1,46	Agreste Gard 2002
Melon sous serre	3,5	Agreste Gard 2002
Pêche	2,72	Agreste Gard 2002
Pomme	3,9	Agreste Gard 2002
Poire	2,61	Agreste Gard 2002
Olive	0,14	Agreste Gard 2002
Vigne	0,6	Agreste Gard 2002
Blé dur	0,38	Agreste Gard 2002
Maïs grain	0,89	Agreste Gard 2002
Prairies	0,49	Agreste Gard 2002

### Rations alimentaires des animaux d'élevage\*

	Vache		Chèvre		Volaille		Agneaux		Mouton		Porc	
	kg/j	durée (mois)	kg/j	durée (mois)	kg/j	durée (mois)	kg/j	durée (mois)	kg/j	durée (mois)	kg/j	durée (mois)
herbe	77	6	8	12			8	12	8	12		
maïs ensilé	64	6										
maïs grain					0,1	12					2,5	12

\* Valeurs issues de (Rommens 1997)