

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

## **Entraînement et redistribution des radionucléides sur le bassin versant de la Peyne**

Rapport préliminaire

Céline DUFFA  
François DANIC

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					
<h3>Entraînement et redistribution des radionucléides sur le bassin versant de la Peyne</h3> <h3>Rapport préliminaire</h3> <p>Laboratoire d'Etudes Radioécologiques Continentales et Marines</p> <p>Rapport DEI/SESURE 2006-11</p>					
	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur*	Chef du SESURE	Directeur DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	C. DUFFA	P. RENAUD	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	30/07/06	31/01/06	2/3/2006	8/03/06	
Signatures					

\* rapport sous assurance de la qualité

## HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
0	14/11/2005	Céline DUFFA	Création	
1	15/12/2005	Céline DUFFA		Relecture LERCM
2	30/01/2006	Céline DUFFA		Relecture SESURE

---



---

## LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Organisme
Céline DUFFA	IRSN / DEI / SESURE / LERCM
François DANIC	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
D. CHAMPION	DEI/DIR
D. BOULAUD	DEI/DIR
B. DUFER	DEI/DIR
JM PERES	DEI/SARG
JC GARIEL	DEI/SECRE
P. DUBIAU	DEI/SESUC
JP. MAIGNE	DEI/SIAR
MC. ROBE	DEI/STEME
P. CALMON	DEI/SECRE/LME
B. DESCAMPS	DEI/SESURE/LESE
O. PIERRARD	DEI/SESURE/LVRE
P. RENAUD	DEI/SESURE/LERCM

## **RESUME**

Les transferts de radionucléides présents dans les sols et sédiments sont essentiellement conditionnés par les mobilités des vecteurs physiques qui constituent leurs supports. L'eau est le principal vecteur de transfert naturel, les radionucléides y étant associés sous forme dissoute ou particulaire. Le ruissellement et l'érosion hydrique sont en particulier responsables de l'entraînement et de la redistribution des contaminants suite à un dépôt atmosphérique sur un bassin versant. Toutefois leur effet n'est pas le même en tout point du bassin versant. Le travail entrepris ici vise à élaborer une classification de la sensibilité des sols vis-à-vis de ce phénomène d'entraînement des radionucléides. Les différents facteurs de sensibilité ont été identifiés : pluviométrie, pente, occupation du sol, et nature du sol. Le bassin versant de la Peyne, qui présente une variabilité importante de ces quatre paramètres, constitue le site pilote pour cette étude. Sur ce bassin versant, on cherche à identifier les zones les plus sensibles à l'entraînement des radionucléides, en combinant une approche prédictive théorique basée sur la cartographie et une approche descriptive reposant sur le prélèvement et l'analyse d'échantillons de sol.

# SOMMAIRE

<b>1 INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>2 DEMARCHE</b>	<b>3</b>
<b>3 APPROCHE THEORIQUE</b>	<b>4</b>
3.1 LES FACTEURS DE SENSIBILITE	5
3.1.1 Les précipitations	5
3.1.2 Le type de sol	5
3.1.3 Le couvert végétal	6
3.1.4 La pente	6
3.2 SENSIBILITE RESULTANTE	6
<b>4 APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA PEYNE</b>	<b>7</b>
4.1 CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES	8
4.2 ETUDE PREDICTIVE	12
4.2.1 Objectif	12
4.2.2 Méthode	12
4.2.2.1 Les précipitations	12
4.2.2.2 Les pentes	13
4.2.2.3 Le couvert végétal	14
4.2.2.4 La nature des sols	15
4.3 ETUDE DESCRIPTIVE	18
<b>5 CONCLUSION</b>	<b>18</b>
<b>6 BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>19</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la Peyne .....	8
Figure 2 : Cartes des précipitations moyennes annuelles (données Météo-France, issues de Bénichou et Lebreton, 1986).....	9
Figure 3 : Carte des altitudes (m) du bassin versant de la Peyne (élaborée à partir du Modèle Numérique de Terrain au pas de 50m, IGN®).....	10
Figure 4 : Carte de l'occupation du sol sur le bassin versant de la Peyne (données Corin Land-Cover, IFEN) .....	11
Figure 5 : Evolution de la pluviométrie et des températures moyennes annuelles pour la station météorologique de Pézénes-les-Mines.....	11
Figure 6 : Classification de la sensibilité des sols du bassin versant de la Peyne en fonction des précipitations.....	13
Figure 7 : Classification de la sensibilité des sols du bassin versant de la Peyne en fonction de la pente .....	14
Figure 8 : Classification de la sensibilité des sols du bassin versant de la Peyne en fonction de l'occupation du sol	15
Figure 9 : Classification de la sensibilité des sols du bassin versant de la Peyne en fonction du type de sol .....	17

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Valeurs moyennes des $K_d$ préconisées par l'AIEA (1994) .....	4
Tableau II : Indices de sensibilité des sols en fonction des précipitations .....	12
Tableau III : Indices de sensibilité des sols en fonction de la classe de pente .....	13
Tableau IV : Contribution à la sensibilité à l'entraînement des sols en fonction des données pédologiques.....	16
Tableau V : Contribution à la sensibilité à l'entraînement des sols en fonction des données géologiques .....	16
Tableau VI : Indices de sensibilité des sols en fonction de la nature des sols .....	16

# 1 INTRODUCTION

Les dépôts atmosphériques de radionucléides artificiels, liés aux essais d'armes nucléaires entre 1945 et 1980, et à l'accident de Tchernobyl en 1986, ont conduit à une contamination globale des sols français. La répartition de ces dépôts peut être estimée à l'échelle du territoire par l'utilisation des modèles empiriques existants. Toutefois, les mesures réalisées dans l'environnement montrent, d'une part une répartition de la contamination dans les sols qui n'est pas forcément à l'image de la répartition estimée des dépôts, et d'autre part que les bassins versants sont des sources d'apports chroniques de ces radionucléides aux différents cours d'eau tributaires. Ces constats mettent en évidence l'existence de phénomènes de remobilisation et d'entraînement des radionucléides déposés, résultant des actions naturelles de ruissellement et d'érosion auxquelles les sols sont assujettis. Ces mécanismes sont eux-mêmes conditionnés par différents facteurs liés au milieu et au contexte environnemental de la zone examinée. Afin de cibler les zones de potentielle reconcentration ou au contraire les zones peu sensibles à l'accumulation des radionucléides et d'évaluer l'évolution de la distribution de la radioactivité à l'échelle du bassin versant, il est nécessaire d'identifier ces différents facteurs, de qualifier et de quantifier leur influence sur l'entraînement des éléments auxquels on s'intéresse. Cette connaissance permettra de caractériser la sensibilité des sols vis-à-vis de l'entraînement des radionucléides, et indirectement, la sensibilité des cours d'eau vis-à-vis des apports du bassin dont ils sont tributaires. Cette étude s'intègre dans le cadre des projets SENSIB visant, à terme, à établir des cartes de sensibilité radioécologique du milieu (Mercat et Renaud, 2003) et EXTREME, qui vise à étudier les phénomènes à l'origine de flux ou de stocks extrêmes de radionucléides dans l'environnement (Eyrolle, 2005).

## 2 DEMARCHE

La sensibilité d'un bassin versant à l'entraînement des radionucléides peut être appréhendée par un bilan établi en sortie du système, c'est à dire par des mesures de flux à l'exutoire, au niveau du cours d'eau. Cette approche, qui doit intégrer les variabilités interannuelles et donc porter au moins sur une dizaine d'années, est suivie dans le cadre de l'étude de F. Vray et al. (2005). Toutefois, les mouvements internes des radionucléides au sein des bassins versants ne peuvent être estimés par cette technique. Il apparaît donc nécessaire de compléter cette approche par des études portant sur la mobilité des radionucléides au niveau des sols eux-mêmes. On parlera ici des flux horizontaux des radionucléides, par opposition aux flux verticaux, responsables de la migration vers la profondeur.

La démarche suivie consiste, dans un premier temps, à identifier les phénomènes responsables de l'entraînement de différents radionucléides artificiels mesurables dans l'environnement français, à savoir  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  et  $^{90}\text{Sr}$ . On s'attachera à prendre en compte le fait que les propriétés chimiques différentes de ces radionucléides peuvent conduire à des comportements différents. Dans un second temps, il sera nécessaire d'identifier et de caractériser les différents facteurs qui conditionnent ces phénomènes. Dans ce rapport, ces deux étapes sont traitées de façon théorique en s'appuyant sur les connaissances existantes en matière de radioécologie et d'érosion des sols. Cette partie théorique doit permettre de lister les paramètres à prendre en compte pour la classification et la cartographie des zones « sensibles » en terme de migration horizontale des radionucléides. Parallèlement, l'étude d'une zone pilote, le bassin versant de la Payne, doit permettre de constater l'effet résultant de ce transport horizontal, et éventuellement de quantifier l'influence des différents paramètres identifiés précédemment.

### 3 APPROCHE THEORIQUE

Le ruissellement est la principale cause d'érosion et d'entraînement des polluants (Ramade, 1987). A ce titre, ce phénomène joue le rôle de vecteur principal de transport des radionucléides. Ce transport se fait sous forme dissoute ou particulaire, le radionucléide étant alors associé aux particules solides soumises à l'érosion hydrique.

Le flux total pour un radionucléide a peut s'écrire comme suit :

$$F_a = Fd_a + Fs_a \quad \text{Équation 1}$$

$F_a$  : Flux horizontal du radionucléide a (Bq/an)

$Fd_a$  : Flux du radionucléide a sous forme dissoute, lié au ruissellement sur les sols (Bq/an)

$Fs_a$  : Flux du radionucléide a sous forme particulaire, lié à l'érosion des sols (Bq/an)

La contribution de chacune de ces deux composantes au flux résultant dépend :

- de la distribution du radionucléide entre forme particulaire et forme dissoute. Bien que ce paramètre soit variable, la connaissance des valeurs de  $K_d$  dans les sols (coefficients de distribution entre forme dissoute et forme particulaire,  $Bq.kg^{-1}/Bq.l^{-1}$ ) doit permettre une évaluation théorique de cette répartition lorsque l'on fait l'hypothèse d'équilibre (Tableau I). D'après cette information théorique, le strontium serait beaucoup plus présent dans la forme dissoute relativement aux autres éléments étudiés. Césium, plutonium et américium sont par contre des éléments avec des coefficients de distribution plus élevés, compris entre 200 et 100000. En terme de concentration, c'est dans la phase solide qu'on trouvera les activités les plus fortes, mais en terme de flux, il sera important de tenir compte des rapports entre flux dissous (quantité d'eau qui ruisselle) et flux solide (quantité de matière associée au ruissellement).

**Tableau I : Valeurs moyennes des  $K_d$  préconisées par l'AIEA (1994)**

	Cs	Sr	Pu	Am
Sol sableux	$2,7 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^1$	$5,4 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$
Sol limoneux	$4,4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^1$	$1,2 \cdot 10^3$	$9,9 \cdot 10^2$
Sol argileux	$1,8 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^2$	$4,9 \cdot 10^3$	$8,1 \cdot 10^3$
Sol organique	$2,7 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^5$

- des quantités de matières concernées (respectivement quantité d'eau contribuant au ruissellement et quantité de matière solide entraînée par érosion). Les études publiées sur l'érosion des sols mettent en évidence des taux d'érosion très variables, compris entre 0 et 200 t/ha/an dans les cas les plus extrêmes (Ramade, 1989), alors que le taux de formation naturelle des sols se situe entre 0,1 et 10 tonnes par hectare et par an en Europe (Commission européenne, 1999).

L'écoulement de l'eau sur un bassin versant se décline de trois manières distinctes :

- le ruissellement de surface,
- les écoulements de sub-surface,
- les infiltrations.

Seul le premier intéresse de manière notable l'entraînement horizontal des radionucléides. Les infiltrations d'eau sont en partie responsables de la migration verticale de la contamination, non traitée dans le cadre de cette étude. Un bilan entre entrée (cumul des précipitations sur un bassin versant) et sortie (flux d'eau à l'exutoire du

bassin versant) du système peut permettre une estimation globale de l'infiltration (dont une part est ensuite évapotranspirée).

Dans tous les cas, la totalité des précipitations apportées par unité de surface se répartit entre ces trois voies, selon des proportions qui dépendent du type de pluie (fréquence et intensité), du type de sol (favorisant ou non l'infiltration) et de son couvert végétal et de la pente du terrain (INRA, 1998 ; PAP/CAR, 1998). Les précipitations, le type de sol, le couvert végétal et sa pente peuvent à ce titre être qualifiés de facteurs de sensibilité vis à vis de l'entraînement des radionucléides par ruissellement, et le flux horizontal de radionucléides résultant peut s'exprimer comme une fonction de ces 4 facteurs (Equation 2).

$$F_a = f(P, S, R, C) \quad \text{Équation 2}$$

$F_a$  : Flux du radionucléide lié à l'érosion (Bq/an)

$P$  : Précipitations,

$S$  : Type de sol,

$R$  : Relief du terrain,

$C$  : Couverture végétale.

## 3.1 LES FACTEURS DE SENSIBILITE

### 3.1.1 LES PRECIPITATIONS

L'intensité des précipitations influe directement sur les quantités d'eau qui ruisselle sur un sol. Or, les entraînements de radionucléides présents dans les sols sont liés au ruissellement, lui même responsable de l'érosion hydrique.

On peut classer les précipitations selon deux catégories :

- les précipitations orageuses, favorisant les écoulements latéraux auxquels on s'intéresse ici,
- les pluies continues, favorisant l'infiltration dans les sols.

Les épisodes d'orages sont les plus susceptibles d'être responsables de l'entraînement de particules de sols et des radionucléides qui y sont associés. Ce rôle des orages a déjà été mis en évidence dans plusieurs études. Citons par exemple l'étude récente de Fukuyama et al. (2005) qui montrent que 90% de l'entraînement annuel du  $^{137}\text{Cs}$  présent sur un bassin versant de Japon s'est produit lors de deux épisodes orageux.

L'identification de ce premier facteur de sensibilité illustre la variabilité géographique de ces phénomènes. Les zones sous climat méditerranéen, soumises à des précipitations souvent sous formes orageuses, s'avèreraient les plus propices au ruissellement et à l'érosion hydrique, en favorisant l'arrachage des particules de sol.

### 3.1.2 LE TYPE DE SOL

La nature et la texture d'un sol jouent un rôle important vis à vis du devenir de l'eau arrivant à sa surface, et de sa sensibilité vis-à-vis de l'érosion.

Selon LeBissonais (INRA, 1998), il faudra s'intéresser à 2 critères principaux : la battance de la couche superficielle de sol, et l'érodibilité du matériau parental.

La battance est un indicateur de la sensibilité d'un sol à la dégradation de sa structure superficielle. Cette dégradation entraîne une diminution des infiltrations d'eau dans le sol, et donc une augmentation du

ruissellement. Sur un sol battant, les particules de sols ont en effet tendance à s'agglomérer sous l'impact des gouttes de pluie et à former une croûte superficielle imperméable favorisant le ruissellement. Selon Baize (1988), un sol est d'autant moins battant que sa teneur en argile et en matière organique est forte.

L'érodibilité des matériaux parentaux rend compte directement de leur cohésion, et donc de leur aptitude à être délités et entraînés par le ruissellement. Il convient donc de déterminer le type de sols auquel on s'intéresse et de caractériser son influence sur l'entraînement par érosion. On sait par exemple que les sols compactés sont moins soumis à l'érosion que les sols meubles et travaillés (sols cultivés). Les sols marneux, lorsqu'ils sont secs, restent non érodibles. Leur sensibilité à l'arrachement et à l'entraînement augmente avec l'humidité (Chebbani et al., 1999). Les argilites, les marnes, les schistes, les basaltes et les gneiss sont très vulnérables à l'érosion par ravinement (Roose, 1994).

### **3.1.3 LE COUVERT VEGETAL**

La couverture végétale des sols joue également un rôle important quant à leur sensibilité à l'érosion. Plus le couvert végétal est dense, plus les sols sont protégés contre l'entraînement. En effet, la végétation protège le sol des processus érosifs. L'interception de la pluie par les plantes diminue le pouvoir érosif direct des pluies, et réduit le volume d'eau qui atteint le sol. Les débris des plantes sur le sol jouent également un rôle protecteur. Cette influence du couvert végétal peut s'avérer importante : Gallien et al. (1995) ont montré que, sur la zone étudiée, un mélange Ray-grass-Trèfle réduisait l'érosion du sol d'un facteur 20 en moyenne par rapport à un sol nu.

Outre les sols nus, les sols occupés par des cultures en ligne (vignes, vergers ou oliviers) sont les plus sensibles à l'érosion. On distingue ensuite les autres types de cultures, puis les sols de forêt, les sols couverts d'arbustes denses, et enfin les sols de prairie. La couverture herbeuse des sols de prairie ou de pâture constitue la meilleure protection contre l'érosion.

### **3.1.4 LA PENTE**

Le pente d'un sol est un facteur déterminant vis à vis du ruissellement, et donc de l'érosion hydrique (Chaplot et Le Bissonnais, 1999). Le taux de ruissellement augmente significativement avec l'angle de la pente. De plus, la charge solide issue de l'érosion semble aussi augmenter avec la pente. Deux principales hypothèses permettent d'expliquer ce phénomène (Cerdan, 2001) : l'accélération du ruissellement avec l'accroissement de la pente, et l'absence d'une lame d'eau qui protège en partie le sol de l'arrachage des particules sur les terrains de pente faible. On estime que pour une pente inférieure à 2% ; la probabilité de ruissellement est faible. Entre 2 et 5%, le ruissellement est possible en cas d'orage ou pour un sol peu filtrant. Sur un sol dont la pente est supérieure à 5%, il y a du ruissellement. Sur les sols de pente supérieure à 10%, le ruissellement devient majoritaire.

## **3.2 SENSIBILITE RESULTANTE**

La sensibilité d'un sol vis-à-vis de l'entraînement horizontal des radionucléides repose donc sur 4 facteurs environnementaux principaux : la nature et l'intensité des pluies auxquelles il est soumis, la pente du terrain, la nature du sol et son couvert végétal. C'est par la combinaison logique de ces facteurs que l'on cherche à restituer l'effet résultant en terme de sensibilité. Toutefois, ces différents facteurs n'ont pas le même poids sur la sensibilité résultante. L'équation 2 devient donc :

$$F_a = xP \otimes yS \otimes zR \otimes kC \quad \text{Équation 3}$$

où x, y, z et k correspondent aux poids respectifs de P (pluviométrie), S (type de sol), R (Pente) et C (Couvert végétal). Cette attribution d'un poids respectif conduit à la fois à hiérarchiser les facteurs de sensibilité et à établir l'importance de leur action sur la sensibilité résultante des sols. Dans l'état actuel des connaissances acquises dans le cadre de cette étude, il n'est pas possible de quantifier ces valeurs de manière théorique pour les radionucléides.

## 4 APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA PEYNE

Afin de compléter l'approche prédictive basée sur les principes énoncés ci-dessus, on travaille en parallèle sur une approche descriptive s'appuyant sur des mesures *in-situ*. L'étude d'un bassin versant ciblé permet d'apporter des informations complémentaires sur le rôle et le poids respectif de chacun des facteurs de sensibilité énoncés dans le chapitre précédent. Le choix de la zone d'étude a été conditionné par différents critères :

- il s'avère que les bassins versants méditerranéens, de par leurs caractéristiques (pentes raides, sols peu profonds et pauvres en matière organique, soumis à des climats de forte variabilité) sont plus sensibles au risque d'érosion. Cette étude appliquée s'intéresse donc à un bassin versant méditerranéen ;
- sa superficie doit être suffisante pour être caractérisée par les informations cartographiques disponibles sous SIG, et pour présenter une diversité suffisante de la sensibilité des sols. Le degré de précision des données cartographiques utilisées est au minimum de 50 mètres, certaines données étant issues de cartes au 1/50000. Il n'est donc pas envisageable d'étudier un bassin versant d'une superficie inférieure à 10 km<sup>2</sup> ;
- la taille du bassin versant doit cependant être d'une superficie raisonnable pour permettre son étude sur le terrain. Il n'est par exemple pas judicieux de travailler sur le bassin versant d'un grand fleuve tel le Rhône ou la Garonne dans un premier temps. Des zones de cette dimension devront faire l'objet d'évaluation dans un second temps, en extrapolant les connaissances acquises ici. La zone à laquelle l'étude de terrain peut s'adapter correspond à un bassin versant plus petit, idéalement inférieur à 100 km<sup>2</sup>.

En essayant de coller au plus près de ces différents critères, le bassin versant de la Peyne, sous-bassin de l'Hérault, a été choisi afin de réaliser cette étude. Celui-ci s'étend entre les villes de Bédarieux au Nord-Ouest, à l'extrémité orientale de la Montagne Noire, et Pézenas au Sud-Est. Il couvre une superficie d'environ 115 km<sup>2</sup> et est situé à une quinzaine de kilomètres au Nord de Béziers (Figure 1). De plus, il fait en partie l'objet de recherches menées par une Unité INRA/IRD de Montpellier, qui étudie les problèmes d'érosion et d'entraînement de polluants sur des parcelles de vignoble identifiées.



Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la Peyne

#### 4.1 CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES

De manière générale, on note une importante variabilité spatiale pour les différentes caractéristiques auxquelles on s'attache ici. On peut néanmoins distinguer deux zones distinctes :

- partie Nord : - superficie de 30 km<sup>2</sup> ;
  - pluviométrie moyenne annuelle plus importante, avec un gradient ascendant du sud vers le nord (830 à 1000 mm/an, Figure 2) ;
  - altitudes et dénivelés plus importants (majoritairement compris entre 50 et 450 m, Figure 3)
  - occupation du sol dominée par des forêts (essentiellement de chênes verts) et des maquis ; les parcelles cultivées sont rares, quelques vignes implantées en fond de vallons (Figure 4) ;

- les sols sont non remaniés, constitués principalement de formations sédimentaires schisteuses relativement bien dégradées au Nord et au Sud de cette partie du bassin-versant. Des carrières de bauxites, situées dans la partie la plus au Nord, couvrant une surface d'environ 1,6 km<sup>2</sup>, captent une partie des eaux de ruissellement qui s'infiltrent. La partie médiane de cette partie du bassin versant, soit environ 45% de la superficie, est constituée de calcaires et dolomies où les eaux s'infiltrent assez bien (données des cartes géologiques Bédarieux et Pézenas 1/50000 du BRGM).

La retenue de barrage des Olivettes, construite en 1989 et située au débouché de la partie amont du bassin versant, est alimentée les eaux drainées sur toute la zone Nord. Le plan d'eau qui en résulte s'étend sur 40 ha.

- partie Sud : - superficie de 87 km<sup>2</sup> ;
  - pluviométrie moyenne annuelle plus faible, avec un gradient ascendant du sud vers le nord (670 à 830 mm/an, Figure 3) ;
  - altitudes et dénivelés plus faibles (majoritairement compris entre 50 et 150 m, Figure 3) ;
  - occupation du sol dominée par des vignobles (Figure 4) ;
  - les sols de vignes sont essentiellement des alluvions anciennes, constituées majoritairement de molasses marno-sableuses et de cailloutis (données de la carte géologique Pézenas 1/50000 du BRGM).

On notera de plus que sur l'ensemble du bassin, les précipitations se répartissent de façon très irrégulières sur l'année. Les averses se font principalement sous formes d'orages durant les mois de septembre et octobre (Figure 5).

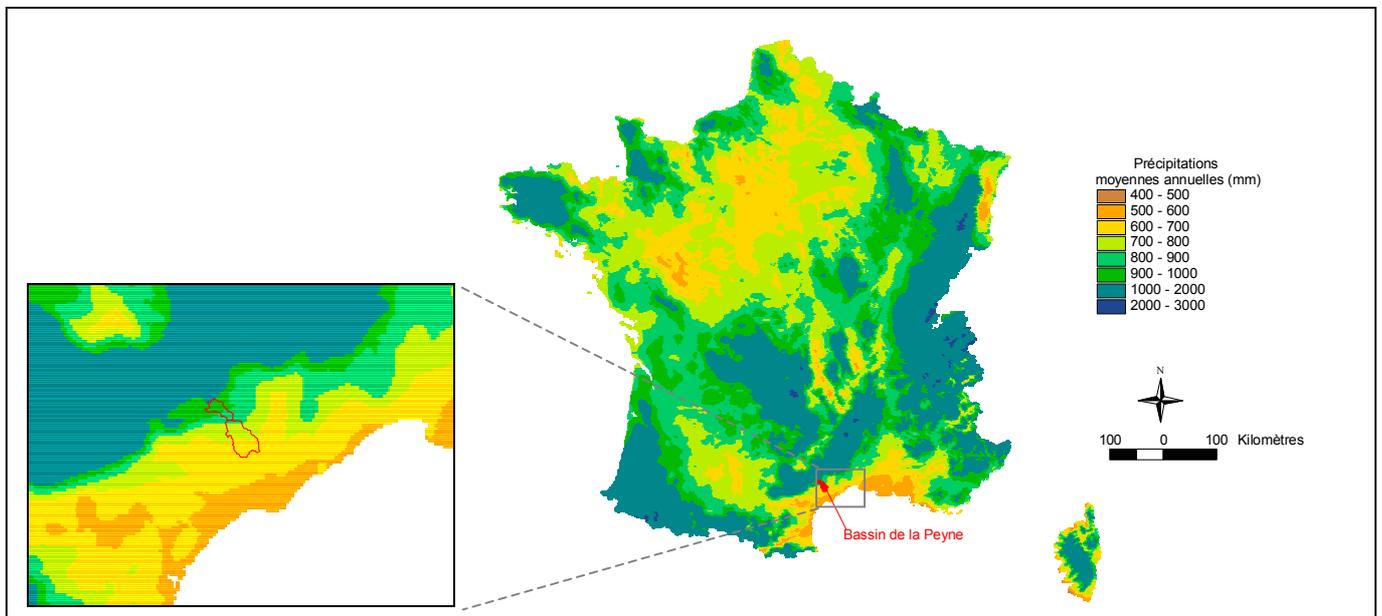


Figure 2 : Cartes des précipitations moyennes annuelles (données Météo-France, issues de Bénichou et Lebreton, 1986)

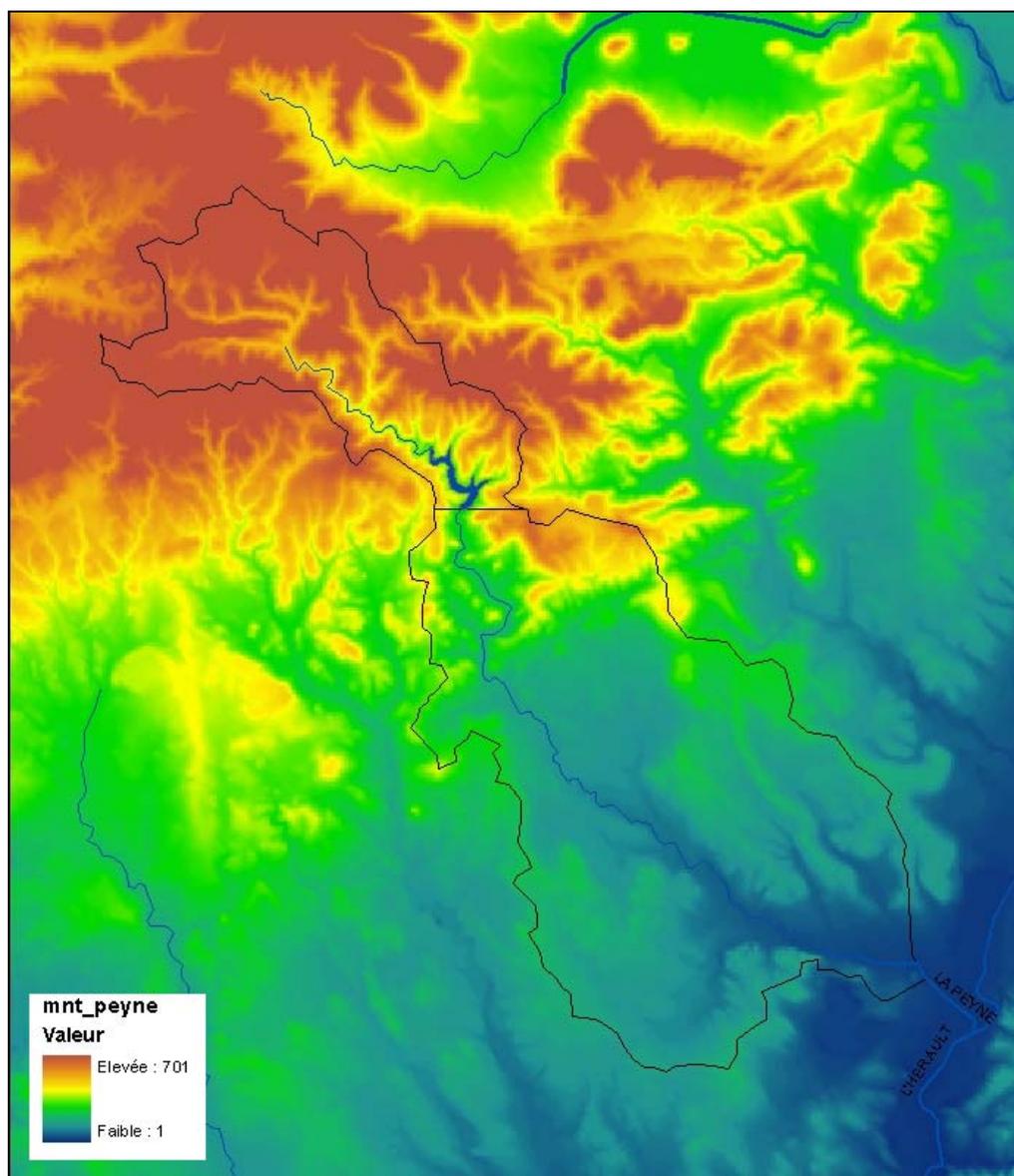


Figure 3 : Carte des altitudes (m) du bassin versant de la Peyne (élaborée à partir du Modèle Numérique de Terrain au pas de 50m, IGN®)

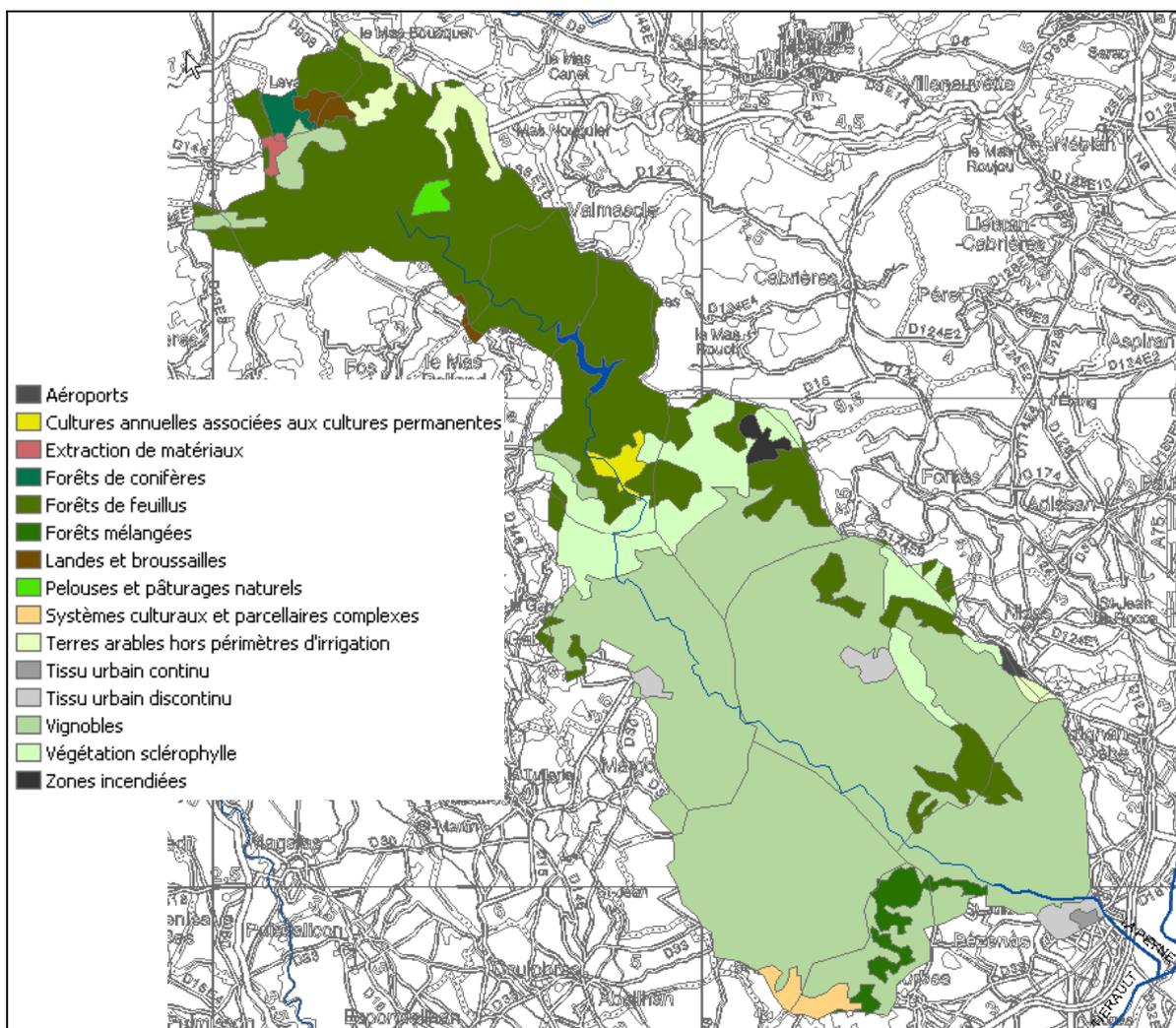


Figure 4 : Carte de l'occupation du sol sur le bassin versant de la Peyne (données Corin Land-Cover, IFEN)

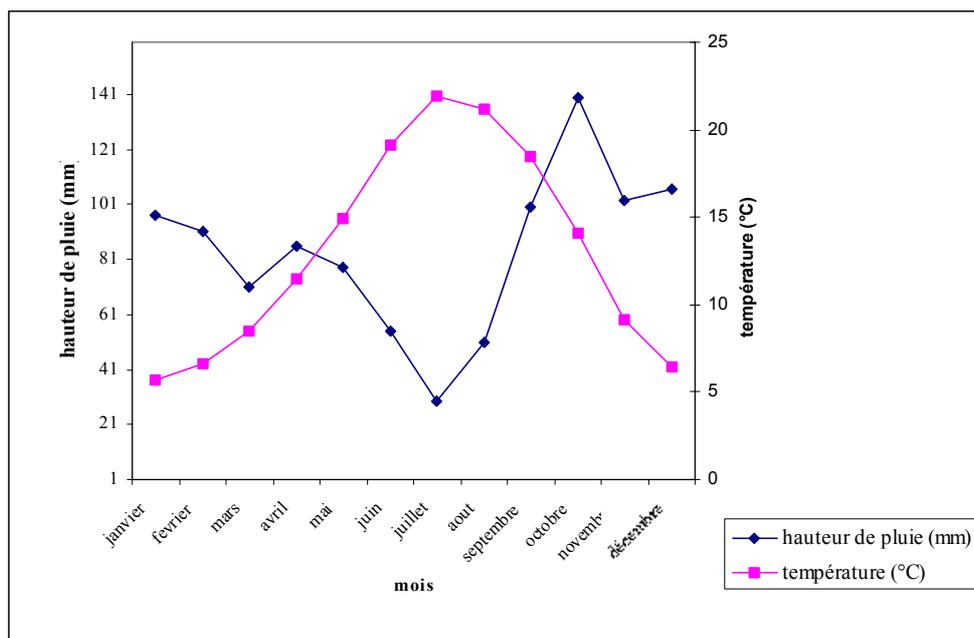


Figure 5 : Evolution de la pluviométrie et des températures moyennes annuelles pour la station météorologique de Pézènes-les-Mines

## 4.2 ETUDE PREDICTIVE

### 4.2.1 OBJECTIF

La localisation des zones susceptibles d'être les plus sensibles au phénomène d'entraînement peut se faire en croisant les différents facteurs de sensibilité identifiés dans le chapitre précédent : pente, pluviométrie, couvert végétal et nature du sol.

### 4.2.2 METHODE

Ce travail est effectué par le croisement spatial de ces données à l'aide d'un SIG (Système d'Information Géographique). Les données d'entrée nécessaires sont disponibles sous formes de fichiers grilles (informations maillées) avec un pas uniforme. Ces fichiers sont obtenus à partir des données cartographiques existantes. Cette approche a déjà été utilisée dans le cadre d'études visant à établir des cartes d'érodibilité des sols (INRA, 1998 ; PAP/CAR, 1998 ; GREPPAL, 2003 ; Duchemin et al., 2005) et s'avère très satisfaisante. Toutefois, cette approche est uniquement qualitative, puisqu'aucune estimation quantitative des taux d'érosion et des pertes en radionucléides ne peut en résulter directement.

L'attribution d'indices de sensibilité est réalisée en se basant sur les connaissances théoriques rappelées dans le chapitre précédent. On choisit d'établir 5 classes de sensibilité (indices de 1 à 5) pour chacun des facteurs de sensibilité impliqués.

#### 4.2.2.1 Les précipitations

Les données des précipitations (Figure 6) sont fournies par le programme AUREHLY de Météo France (Bénichou et Lebreton, 1986). Elles sont classées en cinq catégories, indiquant le niveau de sensibilité vis-à-vis de l'entraînement des radionucléides (Tableau II).

Tableau II : Indices de sensibilité des sols en fonction des précipitations

< 700mm	700-800mm	800-900mm	900-1000mm	> 1000mm
1	2	3	4	5

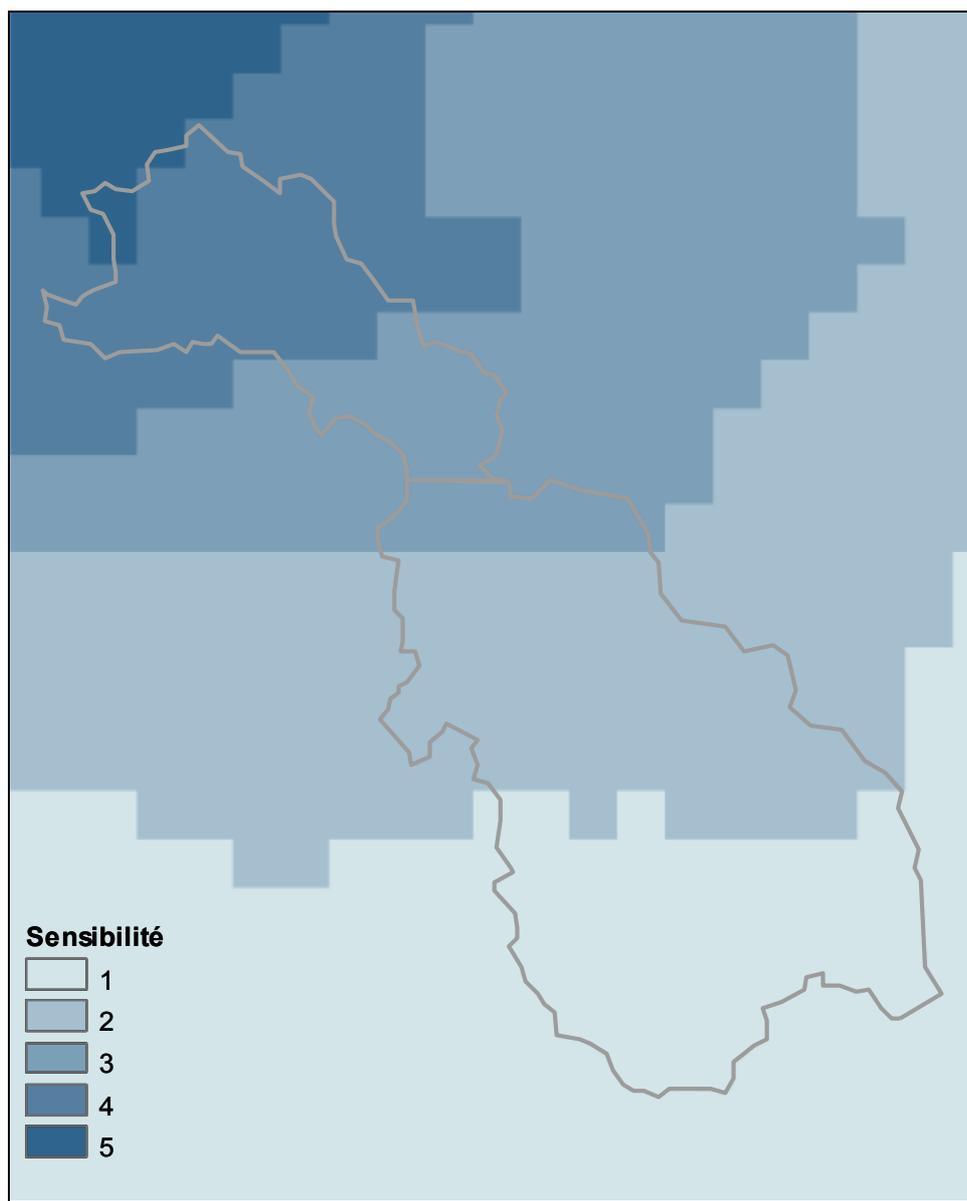


Figure 6 : Classification de la sensibilité des sols du bassin versant de la Payne en fonction des précipitations

#### 4.2.2.2 Les pentes

La classification des pentes (Figure 7) est obtenue à partir des données topographiques (MNT présenté sur la figure 3). Cinq classes de pentes ont été retenues ici : moins de 2%, entre 2 et 5%, de 5 à 10%, de 10 à 15% et plus de 15%. A chacune de ces classes est attribué un indice correspondant à une contribution relative à la sensibilité du sol vis-à-vis du risque d'entraînement des radionucléides (Tableau III).

Tableau III : Indices de sensibilité des sols en fonction de la classe de pente

< 2 %	2 à 5 %	5 à 10%	10 à 15%	> 15 %
Très peu ou pas de ruissellement	Ruissellement possible si orage	Ruissellement avéré	Ruissellement majoritaire	Ruissellement quasi-exclusif
1	2	3	4	5

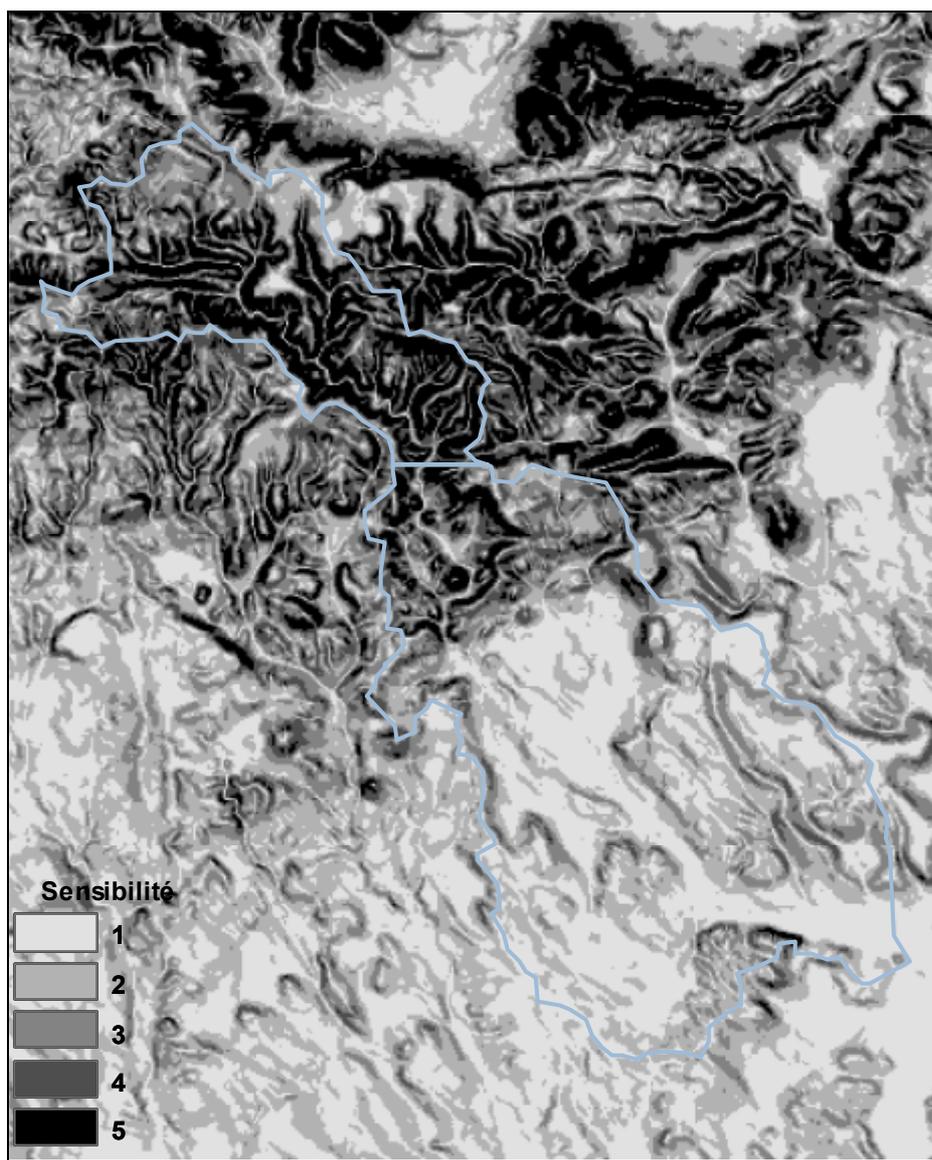


Figure 7 : Classification de la sensibilité des sols du bassin versant de la Peyne en fonction de la pente

#### 4.2.2.3 Le couvert végétal

La classification des différentes couvertures végétales en cinq catégories (Tableau IV) permet, à partir des données d'occupation du sol, d'obtenir la carte présentée sur la figure 8.

Tableau IV : Indices de sensibilité des sols en fonction de la couverture végétale

Sols artificiels	Prairie	Forêt	Autres cultures	Vignes ou vergers
1	2	3	4	5

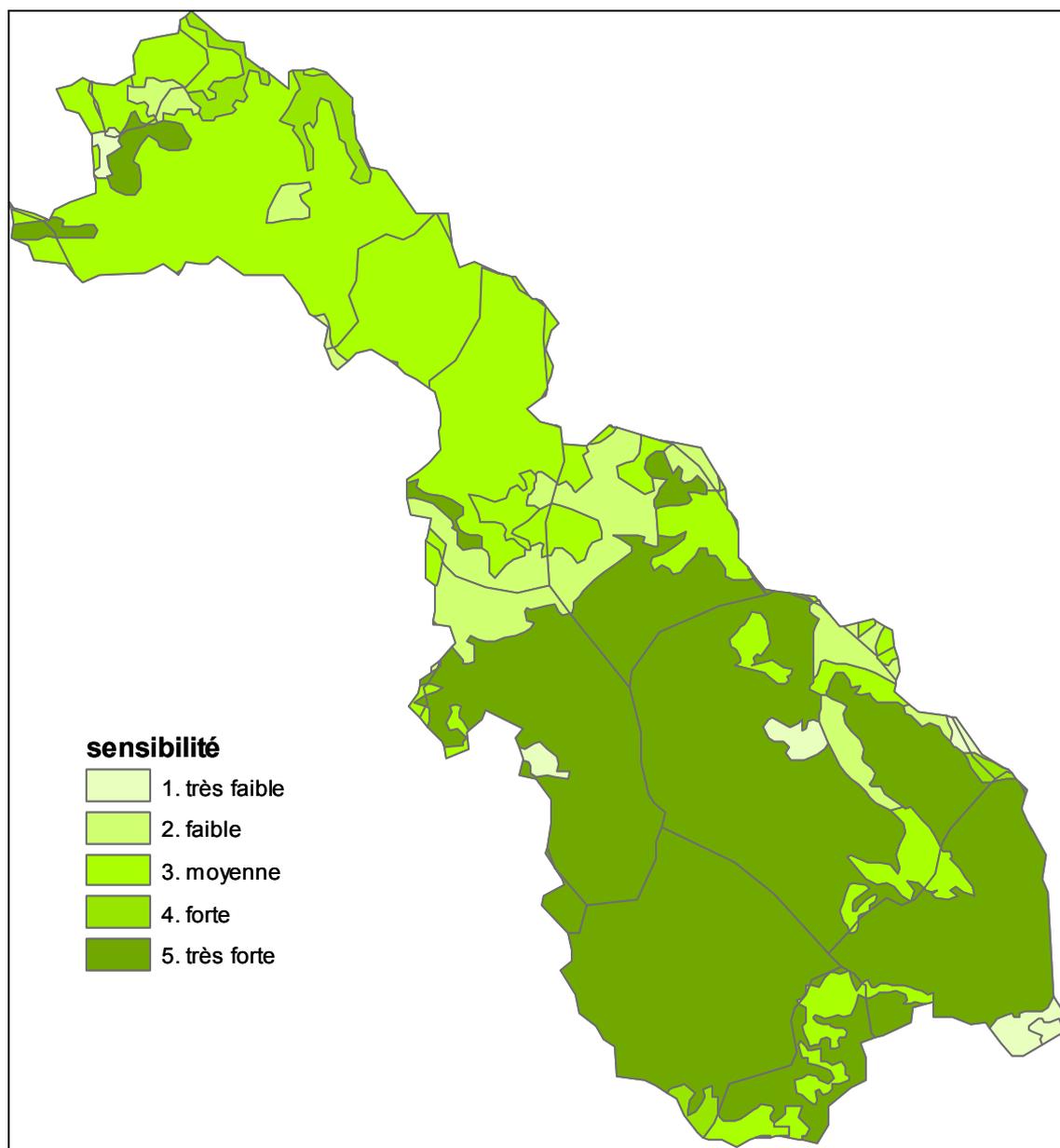


Figure 8 : Classification de la sensibilité des sols du bassin versant de la Peyne en fonction de l'occupation du sol

#### 4.2.2.4 La nature des sols

Afin de classer les sols en fonction de leur nature, il est nécessaire de connaître leur aptitude à la battance et leur niveau d'érodibilité (méthode de Le Bissonnais, INRA 1998). Ce travail se fait en s'appuyant sur les informations disponibles relatives à la texture des sols, le matériau parental et la nature du sol.

Les données pédologiques (issues des cartes des pédopaysages de l'Hérault INRA/IRD au 1/250000) permettent de différencier les types de sol en fonction de leur nature physico-chimique. En se basant sur ce premier critère, on peut classer les sols rencontrés sur le bassin de la Peyne en trois catégories (Tableau IV).

**Tableau IV : Contribution à la sensibilité à l'entraînement des sols en fonction des données pédologiques**

Faible (P <sub>f</sub> )	Neutre (P <sub>n</sub> )	Fort (P <sub>F</sub> )
Histosols, Rendzine, Chernozem, Kastanozem, Greyzem, Phaezem, Ferralsol.	Acrisol, Lithosol, Rendisol, Fluvisol, Regosol, Calcosol, Ranker, Brunisol, Vertisol.	Podzoluvisol, Podzol, Arenosol, Andosol, Fersialsol, Planosol, Xerosol, Solonchak, Solonetz.

Les données géologiques (issues des cartes géologiques BRGM au 1/50000) apportent les informations sur la texture des sols et le type de matériau parental, définissant ainsi la battance et l'érodibilité des sols. Pour la battance, les textures grossières, très grossières et très fines sont classées comme faibles contributrices alors que les textures fines et moyennes sont classées en sensibilité forte ou moyenne, selon la texture secondaire et le matériau parental. L'érodibilité des sols est estimée comme faible pour des roches massives, et forte pour les roches friables et les sols à texture grossière.

**Tableau V : Contribution à la sensibilité à l'entraînement des sols en fonction des données géologiques**

Faible (G <sub>f</sub> )	Neutre (G <sub>n</sub> )	Fort (G <sub>F</sub> )
Roches massives : Calcaire, Granite, Basalte...	Roches peu friable : Flysch, Marnes, Grès, Argilite...	Roches friables et sols à textures grossières : Sable, Molasse, Dolomies, Schistes..

L'attribution d'indices de sensibilité compris entre 1 et 5 se fait en tenant compte de ces deux niveaux d'information (Tableau VI).

**Tableau VI : Indices de sensibilité des sols en fonction de la nature des sols**

P <sub>f</sub> G <sub>f</sub>	P <sub>f</sub> G <sub>n</sub> , P <sub>n</sub> G <sub>f</sub>	P <sub>f</sub> G <sub>F</sub> , P <sub>n</sub> G <sub>n</sub> , P <sub>F</sub> G <sub>f</sub>	P <sub>n</sub> G <sub>F</sub> , P <sub>F</sub> G <sub>n</sub>	P <sub>F</sub> G <sub>F</sub>
1	2	3	4	5

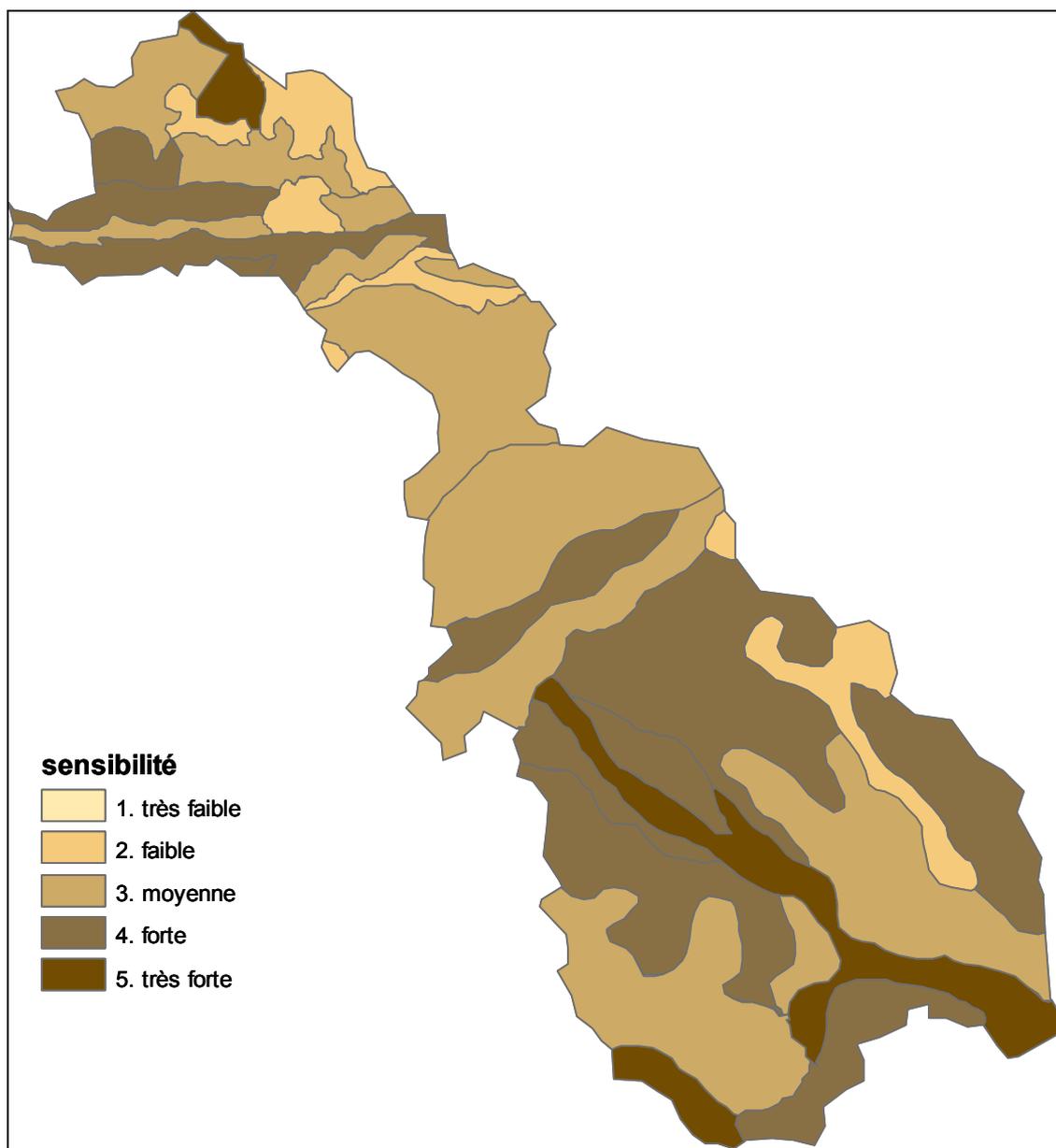


Figure 9 : Classification de la sensibilité des sols du bassin versant de la Payne en fonction du type de sol

Dans l'approche prédictive, la suite du travail consistera à croiser les différentes cartes obtenues. Cette approche est calquée sur le travail réalisé par l'INRA (Le Bissonnais, 1998) afin de classer les sols français en fonction de leur aléa érosif. Cependant, l'érosion n'est ici qu'un moyen de transfert, l'objectif étant l'étude du comportement des radionucléides

Toutefois, chacun des 4 facteurs de sensibilité (pente, pluviométrie, occupation du sol, et nature du sol) n'a pas le même poids sur la sensibilité résultante. Afin de hiérarchiser l'importance de chaque paramètre et autant que possible de quantifier son poids respectif, cette étude est complétée par un volet descriptif s'appuyant sur des observations de terrain.

### 4.3 ETUDE DESCRIPTIVE

L'état actuel de la répartition spatiale des Pu, Cs, Am et Sr dans le bassin versant de la Payne résulte à la fois de la répartition des dépôts initiaux et de leur entraînement durant plusieurs années.

Il s'agit ici non pas de vérifier directement le résultat de l'approche théorique car, à une telle échelle, cela nécessiterait de réaliser un nombre beaucoup trop important de mesures sur le terrain afin d'en tirer une carte par extrapolation. Il s'agit plutôt de compléter l'approche théorique, les deux volets de cette étude étant menés en parallèle. On cherche à rendre compte de l'effet des 4 facteurs de sensibilité identifiés que sont la pluviométrie, la pente, le couvert végétal et le type de sol sur la répartition des radionucléides. Cette partie du travail devrait apporter des informations permettant de hiérarchiser ces paramètres, et si possible de leur attribuer un poids respectif.

Le principal problème attendu est la difficulté à distinguer les sources d'hétérogénéités spatiales des activités mesurées dans les sols. Afin de s'affranchir des hétérogénéités liées aux dépôts atmosphériques des essais nucléaires, on peut utiliser un traceur naturel des apports atmosphériques chroniques tel que le  $^{210}\text{Pb}$ . Les hétérogénéités des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  issu de Tchernobyl restent bien sûr possibles, bien que la zone choisie ait connu une pluviométrie uniforme au moment du passage du panache (entre le 1<sup>er</sup> et le 5 mai 1986).

Ce travail repose alors sur la mesure des activités en  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  et  $^{241}\text{Am}$ , mais aussi de  $^{210}\text{Pb}$  dans les sols. Les prélèvements des échantillons devront se faire selon un plan d'échantillonnage permettant de répondre au mieux aux objectifs fixés et dimensionné afin de respecter les contraintes liées à la métrologie (notamment le nombre restreint de mesures de Pu et de Sr).

Plusieurs campagnes de prélèvements doivent permettre de mener cette partie de l'étude pas à pas. La discrimination de différents phénomènes responsables des hétérogénéités constatées des activités surfaciques des sols est en effet particulièrement complexe. Un rapport à venir consacré à ce volet descriptif permettra de présenter de façon détaillée la stratégie d'échantillonnage et les premiers résultats obtenus.

## 5 CONCLUSION

Suite à un dépôt radioactif, les sols constituent des réservoirs pour les radionucléides artificiels. Toutefois, leur répartition spatiale peut évoluer dans le temps, ceux-ci étant entraînés par l'eau apportée par les précipitations. Le ruissellement, lui-même directement responsable de l'érosion hydrique des sols, est le principal vecteur de ces transferts. Différents facteurs conditionnent la sensibilité d'un sol vis-à-vis de cet entraînement horizontal : sa nature, sa pente, son couvert végétal et les précipitations auxquelles il est soumis. Ces facteurs de sensibilité, identifiés à partir des connaissances existantes en matière de ruissellement et d'érosion des sols, ont un rôle et un poids respectif qu'il convient de définir afin d'aller vers une cartographie de la sensibilité des sols, tel qu'on cherche à le faire dans le projet SENSIB. C'est en se basant sur la méthode de cartographie par combinaison logique de ces paramètres proposée par l'INRA que l'on étudie la sensibilité des sols du bassin versant de la Payne. L'ensemble des données nécessaires à cette étude est présenté dans ce rapport, issue d'un premier travail de classement pour chacun des facteurs de sensibilité identifiés. La suite du travail consiste à croiser ces données afin, dans un premier temps, de définir les zones de sensibilités différentes sur le bassin de la Payne. L'analyse d'échantillons de sol prélevés dans ces différentes zones doit permettre de constater en parallèle l'effet résultant de l'entraînement du  $^{137}\text{Cs}$ , du  $^{90}\text{Sr}$ , et du  $^{239+240}\text{Pu}$  déposés suite aux essais nucléaires des années 1960 et, en ce qui concerne le  $^{137}\text{Cs}$ , en partie suite à l'accident de Tchernobyl en 1986.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

- AIEA, 1994, Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments, Technical Report Series n° 364.
- Bénichou P. et Lebreton O., 1986, Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques, Direction de la Météorologie Nationale, Prix Norbert Gerbier 1986.
- Cerdan O., 2001, Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés, Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans.
- Chaplot V. et Le Bissonnais Y., 1999, Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 24, pp1-10.
- Chebbani R., Djilli K., Roose E., 1999, Etude des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser, Algérie, Bulletin Réseau Erosion, Vol. 19, pp 85-95.
- Commission européenne, 1999, Le sol à l'interface de l'agriculture et de l'environnement, Rapport du Groupe Agriculture et Environnement ([http://europa.eu.int/comm/agriculture/envir/report/fr/inter\\_fr/report.htm](http://europa.eu.int/comm/agriculture/envir/report/fr/inter_fr/report.htm)).
- Duchemin M., Lachance M., Lagacé R., Majdoub R., 2005, Variation spatiale et temporelle de l'érosion hydrique et du transport sédimentaire sur un petit bassin versant agricole, Vecteur Environnement, Vol. 38, pp 40-50.
- Eyrolle F., 2005, Projet EXTREME : Rapport de présentation, Rapport IRSN/SESURE/LERCM 2005-07.
- Fukuyama T., Takenaka C., Onda Y., 2005, <sup>137</sup>Cs loss via soil erosion from mountainous headwater catchment in central Japan, Science of the Total Environment, in press.
- GREPPAL (Groupe Régional Eau et Produits Phytosanitaires d'Alsace), 2003, Classification des bassins versants alsaciens en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires, Rapport d'étude.
- INRA, 1998, Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France, INRA/IFEN, 61 p.
- Mercat C., Renaud P., 2003, Rapport de lancement du projet SENSIB, Rapport IRSN/DEI/SESURE 2003-02.
- PAP/CAR, 1998, Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-8/PP/GL.1 Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'Actions prioritaires, 72 p.
- Ramade F., 1987, Eléments d'écologie - Ecologie fondamentale, Ed. McGraw-Hill, 401 p.
- Ramade F., 1989, Eléments d'écologie - Ecologie appliquée, Ed. McGraw-Hill, 578 p.
- Roose E., 1994, Introduction à la GCES, Bulletin pédologique FAO 70, 420 p.
- Vray et al., 2005, Étude de la dynamique de drainage du <sup>137</sup>Cs présent sur les bassins versants des cours d'eau français, Rapport IRSN/DEI/SESURE 2005-01.