



Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols

Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales

BRGM/RP-55104-FR
Décembre 2006



Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols

Rapport n°3 : Synthèse et recommandations
générales

BRGM/RP-55104-FR
Décembre 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 06RISZ02

**Cerdan O, Le Bissonnais Y, Souchère V, King C, Antoni V, Surdyk N, Dubus I,
Arrouays D, Desprats JF.**

Vérificateur :

Nom : C. King

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Date :

Signature :

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000,



Mots clés : Erosion, Département, Zonage, Directive cadre pour la protection des sols

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Cerdan O, Le Bissonnais Y, Souchère V, King C, Antoni V, Surdyk N, Dubus I, Arrouays D, Desprats JF. 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales. Rapport BRGM-RP-55104-FR, 85 pp., 24 ill.

Synthèse

L'érosion des sols et ses conséquences représentent un des enjeux environnementaux actuels majeurs (<http://www.euractiv.com/en/environment/soil-protection-strategy-leaves-choices-member-states/article-158098>). Outre la perte du capital sol et les dégâts directs causés sur les terres agricoles, les dommages entraînés comprennent la pollution des points de captage des eaux potables, l'eutrophisation des cours d'eau et l'inondation des zones urbanisées en aval du territoire agricole sous la forme de coulées boueuses.

Par ailleurs, on observe une sensibilité grandissante des organisations gouvernementales et du public aux effets néfastes, directs ou indirects, de l'érosion des sols qui s'explique par l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements érosifs. En dehors de l'aléa climatique, qui a toujours été présent, cette évolution a deux causes principales :

Les changements majeurs qui se sont produits ces quarante dernières années en termes d'occupation du sol, notamment au travers de l'intensification de l'agriculture (suppression des éléments structurant le paysage, retournement des prairies, agrandissement des parcelles...) qui entraîne une augmentation du risque érosif et une accélération des taux d'érosion par un facteur allant de 10 à 100 (Meade et al., 1990).

L'augmentation de la sensibilité et de la vulnérabilité aux phénomènes érosifs avec l'accroissement de l'urbanisation en aval des terres cultivées (Auzet, 1987; 1990 ; Le Bissonnais et al., 1998).

Dans ce contexte, le parlement français a voté une loi le 30 juillet 2003 (n°2003-699) visant à mettre en œuvre des mesures de lutte contre l'érosion des sols. Le décret n°2005-117 paru le 12 février 2005 a précisé les termes de cette loi en indiquant **notamment la nécessité de « réaliser un zonage des risques d'érosion » sous la responsabilité des préfets**. De ce fait, on constate une multiplication récente d'essais de zonage par des organismes publics ou privés. La diversité des méthodes et le manque de validation des approches proposées posent le problème de l'harmonisation et de la fiabilité de ces méthodes.

Cette étude, financée par le **Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable**, a donc pour but de définir un cahier des charges pour l'établissement d'un zonage de l'aléa érosion à l'échelle départementale. Pour cela le projet s'est basé sur la méthodologie élaborée par l'Institut National de Recherches Agronomiques qui visait à cartographier le risque « Erosion des Sols » sur l'ensemble du territoire français, à l'échelle du 1/1.000.000. Plusieurs étapes ont été nécessaires pour atteindre cet objectif :

- tout d'abord, une étude de synthèse afin de définir le contexte général ; tant au niveau législatif, notamment en ce qui concerne les récentes avancées de la

directive cadre européenne sur la conservation des sols, qu'au niveau technique sur les différentes approches de modélisation existantes ;

- une étude technique pour définir la structure et la paramétrisation les plus adaptées en s'appuyant sur deux cas tests déjà documentés, les départements de l'Oise et de l'Hérault.

Les résultats de ces travaux sont présentés dans trois rapports, un par étude départementale et le présent rapport qui rassemble les notes de synthèse et la conclusion générale. Plusieurs aspects seront donc passés en revue, notamment :

- Les enjeux liés à la maîtrise ou la réduction du risque érosif,
- Les différentes approches de modélisation de l'érosion existantes pour le choix d'une structure adaptée,
- La synthèse des cas tests sur l'Oise et l'Hérault pour définir la nature et la résolution des facteurs à prendre en compte,
- Des préconisations pour la mise en place de mesure de conservation,
- Et enfin, un note sur l'archivage des données.

Sommaire

1. Enjeux liés à la maîtrise ou la réduction des risques érosifs.....	9
1.1. LES RISQUES EROSIFS EN FRANCE	9
1.2. LA PERCEPTION DES RISQUES.....	9
1.3. REDUIRE ET PREVENIR : LES INITIATIVES NATIONALES.....	10
1.3.1. La structuration des actions de recherche.....	10
1.3.2. L'insertion dans des outils de prévention incitatifs	12
1.4. EXEMPLES D'INITIATIVES PRISES DANS D'AUTRES PAYS MEMBRES.....	15
1.5. PERSPECTIVES QUI SE DESSINENT DANS LA DIRECTIVE EUROPEENNE.....	16
1.5.1. La Directive.....	16
1.5.2. Les recherches à conduire	19
2. Modélisation de l'érosion des sols	20
2.1. INTRODUCTION	20
2.2. LES VARIABILITES TEMPORELLES ET SPATIALES DES PROCESSUS D'EROSION DES SOLS	20
2.3. PRESENTATION DES TYPES DE MODELES EXISTANT	21
2.3.1. Modélisation distribuée	23
2.3.2. Résolution temporelle	23
2.3.3. Exemples de modélisation à l'échelle régionale	23
2.4. CONCLUSIONS.....	24
3. Présentation de la méthodologie	26
3.1. INTRODUCTION	26
3.2. LA METHODOLOGIE ACTUELLE D'ESTIMATION DE L'ALEA EROSION.....	26
3.2.1. Le sol	29
3.2.2. L'occupation des sols	30
3.2.3. La topographie.....	30
3.2.4. Le climat	31
3.2.5. La hiérarchisation	32

3.3. ANALYSE CRITIQUE DE L'ARBRE DE DECISION	33
3.3.1. Les Avantages des arbres de décisions	33
3.3.2. Les inconvénients des arbres de décisions.	33
3.4. ALTERNATIVES ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION.....	35
3.4.1. Les modèles déterministes ou empiriques.....	35
3.4.2. Les analyses multicritères.....	37
3.4.3. L'amélioration du calcul des critères individuels	41
3.5. CONCLUSION	42
4. Vers un cahier des charges pour un zonage de l'érosion des sols	45
5. Préconisation pour la mise en place de mesures préventives	49
5.1. INTRODUCTION.....	49
5.1.1. Etat de l'art.....	49
5.1.2. Gestion collective du ruissellement érosif au sein des versants ou des bassins versants	52
5.2. DE QUELLES DONNEES A-T-ON BESOIN POUR METTRE EN ŒUVRE DES PRATIQUES OU DES DISPOSITIFS ANTIEROSIFS ?.....	57
5.2.1. Données sur le milieu physique	57
5.2.2. Les données sur l'occupation des sols	65
6. La « bancarisation » des zonages de l'aléa érosif	71
7. Conclusion.....	75
8. Bibliographie	79

Liste des illustrations

Illustration 1 : densité des coulées boueuses et crues turbides (nombre d'évènements par km ²) en France entre 1985 et 1995 (Le Bissonnais et al., 2002a).....	13
Illustration 2 : Processus d'intégration des objectifs des Etats Membres (source DG Env.).....	18
Illustration 3 : calendrier provisoire de la mise en place de la Directive (source DG Env.).....	18
Illustration 4 : Exemple d'arbre de décision. L'arbre est composé de plusieurs nœuds ayant chacun un critère de décision.	27
Illustration 5 : modèle arborescent pour le calcul de l'aléa érosion.	28
Illustration 6 : Sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance (d'après Le Bissonnais et al., 2002).....	29
Illustration 7 : Description des 9 catégories d'occupation du sol utilisées dans la méthodologie actuelle (d'après Le Bissonnais et al., 2002)	30
Illustration 8 : Classes de pentes (d'après Le Bissonnais et al., 2002)	31
Illustration 9 : Croissement des classes d'intensité et des classes de volume des pluies pour obtenir les classes d'agressivité du climat.....	32
Illustration 10 : Présentation de quelques modèles déterministes permettant de simuler l'érosion des sols. Chacun à des caractéristiques propres répondant à des besoins des utilisateurs.	35
Illustration 11 : Exemple d'utilisation d'un modèle déterministe pour la classification de l'aléa érosion. Des ensembles de paramètres de sol, de climat et de couverts végétaux sont combinées pour générer un grand nombre de simulations.....	36
Illustration 12 : Représentation schématique du fonctionnement d'un réseau de neurone. Le neurone Y ₃ réalise une combinaison des valeurs des nœuds (X _n), pondérée par le poids des connexions (δ _n).	38
Illustration 13 : Dans un système booléen une valeur ne peut appartenir qu'à une classe. Ici, la valeur 2,9 bien que très proche de seuil est à 100% dans la classe A et à 0% dans la classe B.....	40
Illustration 14 : Lorsque la logique floue est utilisée, une valeur peut appartenir à plusieurs classes. Ici, un échantillon ayant une valeur de 2,9 appartient à 55% à la classe B et à 45% à la classe A.....	40
Illustration 15 : recommandation sur la nature et la résolution des données à utiliser pour un zonage de l'aléa érosion à l'échelle départemental.....	47
Illustration 16 : Nouvelle version des règles de pédotransfert pour estimer les facteurs de battance et d'érodibilité sur le territoire métropolitain (EG : Abondance en éléments grossiers en %, MO : abondance en matière organique en %, E : érodibilité, B : battance, 1 : très faible, 2 : faible, 3 : moyenne, 4 : forte, 5 : très forte).	47
Illustration 17 : règle de pédotransfert permettant de convertir les données texturales en classes de battance et d'érodibilité par projection dans les triangles de texture	

redécoupés en 5 classes de sensibilité : 1 : très faible, 2 : faible, 3 : moyenne, 4 : forte, 5 : très forte (Source INRA-IFEN).....	48
Illustration 18 : Changements, en pourcentage de surface, observés sur les cartes de sensibilité à l'érosion par rapport aux changements effectués sur les cartes des paramètres intermédiaires.....	48
Illustration 19 : Spatialisation des marges de manœuvre sur le bassin versant de Bourville (76).....	54
Illustration 20 : Représentation d'un système complexe de gestion de ressources naturelles	56
Illustration 21 : Etat d'avancement des Référentiels Régionaux Pédologiques (GIS Sol, 2006).....	59
Illustration 22: Données pluviométriques disponibles en France en fonction du type de station	61
Illustration 23: Station météorologique sur la France	62
Illustration 24 : Schéma organisationnel de la bancarisation des données : les données élaborées au niveau départemental doivent être thésaurisées, harmonisées, diffusées, inter-opérables au niveau national et européen. La structure existante du Gis Sol permettrait de répondre à ces besoins.	73

1. Enjeux liés à la maîtrise ou la réduction des risques érosifs

1.1. LES RISQUES EROSIFS EN FRANCE¹

L'érosion est définie comme étant l'arrachage et le transport par l'eau ou le vent des particules du sol. C'est un processus géologique naturel essentiel à la formation des sols et des paysages.

En France, l'érosion des sols a été longtemps considérée comme un problème principalement lié aux fortes pentes et/ou aux fortes précipitations comme l'avaient confirmé les enquêtes nationales réalisées auprès des services départementaux (Henin et Gobillot 1950). De ce fait elle a été circonscrite aux Alpes, aux Pyrénées et à la zone méditerranéenne, avec des actions de prévention ou réduction des risques établies en lien avec les services de RTM (Restauration des Terrains en Montagne). Dans ces régions l'érosion torrentielle a régressé durant le XXe siècle grâce d'une part à des politiques d'aménagement (reboisement, naturelle ou artificielle, et contrôle des torrents) et d'autre part à la diminution de l'agriculture d'altitude (Lilin 1986).

Une réelle attention n'a été portée à l'érosion des sols agricoles dans les paysages de plateaux et collines qu'à partir des années 1970, en particulier dans les régions sujettes à une extension de l'urbanisation. Des enquêtes successives établies pour les Ministères de l'Agriculture, de l'Environnement puis de l'Environnement et du Développement Durable, (Auzet, 1987a & b, Le Bissonnais et al., 1998, 2002a & b), et des synthèses régionales très nombreuses (Auzet et al. 2006) ont progressivement démontré que d'autres territoires étaient affectés par des processus d'érosion hydrique et que des mécanismes catastrophiques se produisaient au sein même des espaces agricoles : Champagne, Picardie, Bretagne, Alsace, Normandie, vallée du Rhône, Lauragais et Terrefort, et bien sûr les régions méridionales avec des mécanismes intensifiés en zones forestières incendiées et en vignoble. Dans tous les cas le mode de gestion de l'espace agricole est apparue comme jouant un rôle très important.

1.2. LA PERCEPTION DES RISQUES

L'impact environnemental de l'érosion des sols a d'abord été significativement perçu dans les zones situées en aval des zones agricoles, avec les dégâts liés aux coulées boueuses et crues turbides. Ainsi plus de 15 000 événements de cette nature ont été enregistrés entre 1985 et 2001 en France (Le Bissonnais et al, 2002b, et Heitz 2004). Ces événements affectent parfois la sécurité des populations (on peut citer pour exemple l'épisode de Villers Ecalles - Haute Normandie

¹ La synthèse de ce chapitre provient pour l'essentiel du chapitre Erosion en France de A.V Auzet, Y. Le Bissonnais, V.Souchère dans « **Soil Erosion in Europe** » J. Boardman and J. Poesen (Eds), août 2006.

en 1997 qui avaient occasionné 2 morts) et représentent clairement des menaces avérées sur les biens. Quelques chiffres : sur 5 579 évènements de coulées boueuses, enregistrées comme catastrophes naturelles de 1985 à 1995, on a relevé 34 326 édifices affectés, dont 26 112 maisons individuelles (Le Bissonnais et al., 2002a, 2002b). Les routes et autres ouvrages collectifs, les écosystèmes terrestres et aquatiques et certaines ressources souterraines en eau potable sont touchés, avec des interruptions souvent saisonnières de leur exploitation.

Le coût de toutes ces conséquences, bien qu'encore mal documenté, pourrait ainsi s'avérer très élevé en France.

Paradoxalement, au sein même des espaces agricoles, l'ablation d'une partie du sol par formation de ravines, voire sa disparition, ne représentent encore souvent qu'une menace diffuse et reste difficile à quantifier. Néanmoins cette érosion est maintenant incontestable. Partout elle induit des changements importants de caractéristiques physiques de surface des sols. Elle atteint directement les fonctions agronomiques du sol (cultures détruites par arrachage ou recouvrement) et également toutes ses fonctions environnementales.

Au-delà des zones où la pente et la pluviométrie restent des facteurs majeurs, un récent bilan montre en bref que l'érosion s'aggrave dans deux types de régions (Auzet et al 2006) :

- Les régions présentant une forte concentration de cultures annuelles ou spécialisées, comme les vignobles et les cultures légumières.
- Les régions à forte extension urbaine.

1.3. REDUIRE ET PREVENIR : LES INITIATIVES NATIONALES

1.3.1. La structuration des actions de recherche

Ces dernières années, les actions de recherche nationales ont visiblement structuré le tissu des acteurs grâce aux principaux programmes de recherche nationaux du domaine, à titre d'exemple on peut citer (sont volontairement omis les études concernant les échelles de temps géologiques) :

- Programme GESSOL du MEDD (gestion durable des sols): projets « Maîtrise collective par les agriculteurs du ruissellement érosif sur le territoire agricole », 1998-2002, et « Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés », 2003- 2007, leader INRA,
- Programme PNRH (programme national de recherche en hydrologie) : projet RIDES (Ruissellement, Infiltration, Dynamique des Etats de Surface et Transfert de Sédiments) 2003- 2006, leader IMF-Strasbourg,
- Programme RDT du MEDD (Risque Décision Territoire): projets DIGET-CoB « Elaboration et mise en œuvre de dispositifs pour la gestion des territoires générant des coulées boueuses ». 2004-2006, et AcTerre , « Anticiper et accompagner des évolutions de TERRitoires sensibles aux coulées boueuses » 2007-2010, leader INA-PG,

- Programme ANR VMC-Vulnérabilité Milieux et Climat : projet MESOEROS21 « MEditerranean SOils EROSIon and vulnerability to global change during the 21st century », 2006-2010 leader INRA,
- Les observatoires de recherche en environnement tels ceux de Draix et Roujan.

De même des actions d'envergure européenne ont impliqué les acteurs français, qui ont contribué activement à l'émergence de la directive cadre sur la protection des sols.

L'INRA a engagé depuis 1990 en lien avec le Centre Commun d'Ispra (Italie) la coordination de la carte des sols d'Europe, puis la création et l'animation du Réseau du Bureau Européen des Sols rassemblant les principaux centres d'information sur les sols de plus de 30 pays.

Sur ce thème spécifique de l'érosion et du ruissellement, les acteurs français du sujet ont animé ou contribué à des projets européens des différents programmes cadre de recherche (PCRD) ou de l'AEE, par exemple :

- 4e PCRD –CEO - Floodgen, Leader BRGM, autre acteur français INRA
- 5e PCRD- Pesera, leader U.Leuven (B) , acteur français INRA
- 5e et 6e PCRD réseau Cost, leader IMFS, autres acteurs français INRA, BRGM,
- 6e PCRD RISKBASE , leader TNO (NL), acteur français BRGM
- Agence Européenne de l'Environnement « Assessing economic impacts of soil degradation” mise en œuvre par Ecologic & le BRGM en 2004-2005.

La restitution très récente des travaux du programme GESSOL du MEDD (novembre 2006) a bien résumé les avancées principales touchant aux fonctions du sol, aux dégradations qui les affectent et aux programmes nationaux de surveillance.

Dans le cas de l'érosion les avancées touchent principalement :

- aux méthodes d'inventaire des zones concernées, par mesures in situ et par modélisation spatialisées
- à l'analyse des mécanismes et leurs impacts sur les fonctions du sol,
- à l'identification d'indicateurs pertinents selon les contextes et les processus en jeu,
- aux tests de métrologies in situ et satellitaires pour atteindre ces indicateurs et/ou organiser une surveillance,
- à l'identification et la validation technique et économique de bonnes pratiques anti-érosives (dimension des parcelles, orientation des labours, bandes enherbées, conduite des inter-cultures, itinéraires techniques, pratiques culturelles adaptées comme la simplification du travail du sol...) dont l'efficacité varie selon les contextes.

- à la prise en compte d'outils d'aide à la décision pour une gestion collective des espaces sensibles.

Les travaux se basent sur des approches expérimentales allant du local au régional, - in situ par simulations de pluie, protocoles d'essais en parcelles ou en bassins versants, intégration régionale-, avec des collectes de données, des outils de modélisation et des jeux d'acteurs.

Néanmoins ces avancées peuvent apparaître comme conduites de façon encore discontinues, tant sur le territoire que dans les relais entre acteurs « recherche/ services de l'Etat/ exploitants ». Des recherches sont encore nécessaires pour garantir une utilisation durable des sols et préserver leur multifonctionnalité.

1.3.2. L'insertion dans des outils de prévention incitatifs

L'insertion de ces problématiques dans des outils de prévention incitatifs s'organise progressivement.

La loi de 1982

Depuis la loi de Juillet 1982, les propriétaires doivent prendre une assurance individuelle contre les risques naturels. A travers le mécanisme de la réassurance et avec la garantie de l'Etat, ils peuvent être remboursés si le dommage subi est reconnu lié à une catastrophe naturelle. Les maires des communes concernées soumettent une telle déclaration à un comité inter-ministériel, la reconnaissance de cet état dit « de Cat Nat », étant le plus souvent fondée sur des critères climatiques (événements pluvieux excédant la moyenne de pluie décennale).

En dépit de nombreuses incertitudes, la base de données CORINTE, disponible sur le web, permet des études très intéressantes sur la localisation de ces événements (Illustration 1; Le Bissonnais et al., 2002a & b) qui ont recoupé pour une bonne part les éléments de synthèse régionales résumés en 1.1. et visibles sur <http://erosion.orleans.inra.fr/rapport2002/>).

Néanmoins de sérieux doutes ont été émis sur l'efficacité des mécanismes de réassurance et leurs effets néfastes sur la perception du risque, voire sur une volonté de prévention (Cartier 1999 ; 2000).

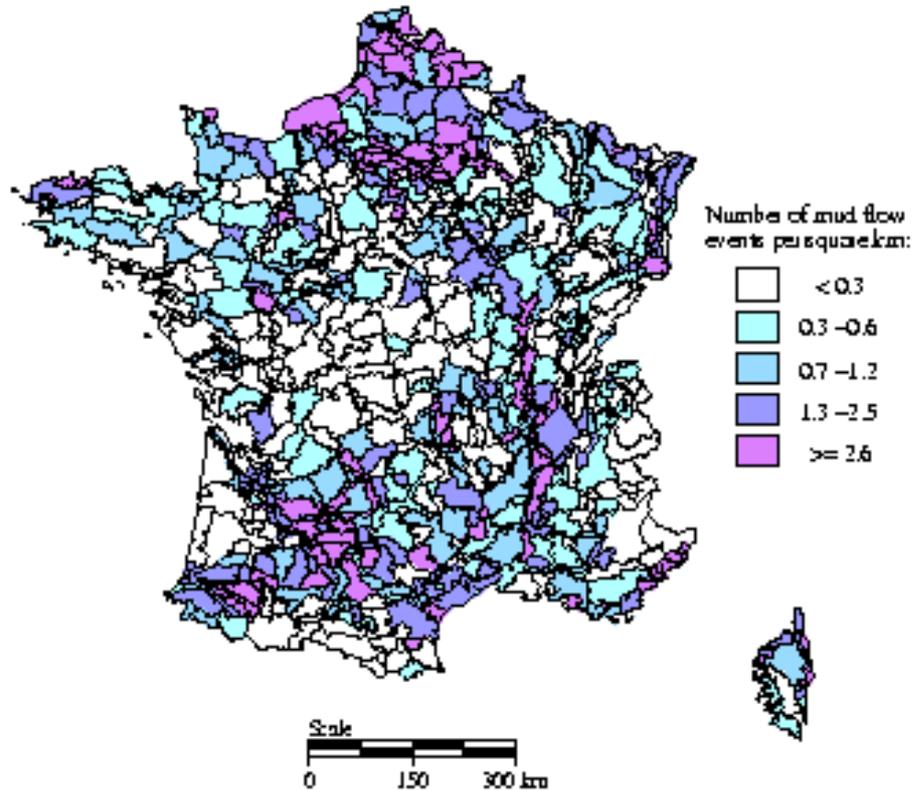


Illustration 1 : densité des coulées boueuses et crues turbides (nombre d'évènements par km²) en France entre 1985 et 1995 (Le Bissonnais et al., 2002a).

De 2000 à 2006 les efforts des organismes, des agences et du MEDD

La prise en compte de ces mécanismes érosifs peut infléchir les effets négatifs du dispositif CAT NAT et apparaît progressivement dans plusieurs interventions préventives de l'Etat. Pour ne citer que quelques exemples dans le contexte métropolitain :

- la création en 2000 de l'unité de service InfoSol chargé par l'INRA de la coordination des programmes de cartographie et de surveillance des sols en France et de la mise à disposition publique des informations collectées.
- la création en 2002 du GIS « Sol » qui constitue désormais l'interface entre l'expertise scientifique et la décision publique dans le domaine des sols (haut comité de groupement constitué du MEDD, du MAPAR, de l'ADEME, de l'INRA et de l'IFEN). Le GIS a déjà mis en place des travaux de zonage et/ou leur réactualisation dans un certain nombre de régions françaises.

- Le BRGM est impliqué de longue date dans plusieurs programmes concernant les sols, notamment les sols urbains et les sites pollués. Appuyé par le MEDD, il répond depuis 2004 aux problématiques de prévention du risque de retrait –gonflement des sols par un programme d'harmonisation et thématisme des cartes géologiques relatives aux formations superficielles et au régoélite.
- Pour plusieurs thèmes, l'INRA et le BRGM ont conjugué leurs efforts pour répondre plus efficacement aux questions de recherche et aux besoins exprimés par les décideurs publics : par exemple, établissement des fonds pédo-géochimiques, transfert de l'eau et des polluants des sols vers les nappes, ruissellement et érosion. Sur ce dernier thème, dès 1990, l'INRA et le BRGM ont développé des méthodologies communes pour cartographier les risques d'érosion à l'échelle régionale sous SIG (2 Atlas « Erosion des sols » en Nord Pas de Calais 1992 et Haute-Normandie 2002), insérer l'observation spatiale dans ces approches (CEE-FLOODGEN 1997-2000) et modéliser les flux d'eau et de particules à l'échelle de petits bassins versants élémentaires (projet MISE-Haute Normandie 2002, projet RIDES-PNRH depuis 2003).
- au niveau des Agences de l'Eau, des Chambres Départementales de l'Agriculture, des agences de développement régional comme l'AREAS, enfin des Syndicats de Bassins versants (en Haute-Normandie 22 syndicats de bassins ont été créés et dotés de ressources humaines adéquates pour faire progresser les méthodes de gestion intégrée collective), on se préoccupe de longue date du transfert de sédiments et de polluants vers les eaux, de la qualité des écosystèmes et de leur dégradation par ces événements catastrophiques (Ouvry 1986, 1992), (Maret, 2004).
- Dès 2003, le Plan de Prévention des Risques d'Inondations (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2003) a insisté sur l'augmentation des risques liés à la genèse du ruissellement dans les petits bassins versants péri-urbains de moins de 10km², qui concerne maintenant 75% des communes françaises.

La connaissance de la répartition des phénomènes érosifs et l'identification des mécanismes en cause aident à progresser vers des solutions préventives. Le MEDD a ainsi soutenu des initiatives d'autorités locales et/ou régionales (Pays de Caux, Artois, Ile de France, Oise, Lauragais, Hérault ...) pour réaliser des inventaires de la situation et identifier des mesures pertinentes.

Selon les contextes, les actions retenues ont été focalisées principalement sur la protection de type structurel - bassins de rétention et mesures hydrauliques –, ou le conseil visant à promouvoir de meilleures pratiques agricoles (Souchère 2003, Witkowski et al., 2004).

Ces efforts de programmes nationaux, des organismes et des agences rendent bien compte du fait que la France a anticipé l'annonce officielle de la Directive Cadre Européenne sur la Protection des Sols. Dans la plupart de ces régions, la prévention de ces risques et la protection des sols et des eaux sont maintenant reconnues comme des priorités par les services du développement agricole, les exploitants, les gestionnaires de l'espace rural, et les établissements de recherche qui gravitent autour. Le consensus est acquis sur la nécessité d'aboutir à une gestion collective du ruissellement érosif des bassins versants. Les approches participatives vont donc être une des clés de la réussite de la réduction de cette « menace ».

La loi de 2003 dite Loi Bachelot

La France a aussi anticipé l'annonce officielle de la Directive Cadre Européenne sur la Protection des Sols dans son dispositif législatif. Dans le cadre de la Loi Bachelot, une loi visant à mettre en œuvre des mesures de lutte contre l'érosion des sols a été votée le 30 juillet 2003 (n°2003-699). Le décret n°2005-117 paru le 12 février 2005 a précisé les termes de cette loi en indiquant notamment la nécessité de « réaliser un zonage des risques d'érosion et d'établir un programme d'action » sous la responsabilité des préfets.

Face à cette exigence, il faut passer des connaissances et des méthodes élaborées dans un cadre scientifique à des solutions répondant à ce cahier des charges et transférables aux acteurs concernés.

Une action commune de l'INRA et du BRGM en appui aux politiques publiques dans le contexte de cette loi peut placer la France en lien direct avec les attentes de la Commission.

1.4. EXEMPLES D'INITIATIVES PRISES DANS D'AUTRES PAYS MEMBRES

Plusieurs pays et organismes ont eux aussi anticipé l'annonce officielle de la Commission sur la Directive SOLS en engageant des réflexions et des actions vers une protection accrue des sols. Voici quelques exemples :

Les anglais sont aussi en avance sur les orientations de la directive (site du DEFRA <http://www.defra.gov.uk/environment/land/soil/sap/index.htm>).

Le Gouvernement a publié en 2001 un projet de Stratégie Sol pour l'Angleterre sur la base d'un document de consultation. Il contient un premier bilan de l'état des sols et les partenariats à mettre en place entre l'Etat et tous les acteurs concernés.

Leur premier plan d'action (1st Farmer Action Plan publié en 2004) couvre la période 2004-2006. Le recensement des zones sensibles a déjà commencé. Toutes une série de mesures sont déjà identifiées et considérées comme efficaces et possibles à mettre en œuvre.

Actuellement 52 actions ont été identifiées pour déterminer l'état actuel, mobiliser sur les mesures à prendre et organiser la surveillance selon les recommandations de la Directive. Ces actions relèvent des champs suivants :

- Un comportement environnemental citoyen (environmental stewardship)
- Des bassins d'action prioritaires
- Espace urbain
- Indicateurs de la qualité des sols
- Information et prévention
- Engagement des acteurs locaux

La mise en place du plan incite les agriculteurs à utiliser des mesures efficaces grâce à une double mécanique qui représente un compromis entre approche participative et contraintes réglementaires :

Information-Prise de conscience-incitation : Un questionnaire a été envoyé aux exploitants. Ils doivent déclarer les problèmes auxquels ils ont à faire face pour protéger leurs sols, et s'engager à mettre en œuvre une ou plusieurs méthodes de remédiation proposée. Ce premier plan viendra à échéance en avril 2007. Une analyse plus fine permettrait d'identifier les avantages et les lacunes d'un tel système pour tester l'hypothèse d'une transposition robuste de certaines solutions en France.

Une structuration étatique s'est aussi mise en place aux Pays Bas. Issue de leur longue pratique d'aménagement collectif du territoire, elle est déjà assez mûre pour faciliter le positionnement de l'Etat Membre face au projet de Directive.

Pour le cas précis de la protection des sols, les « waterboard » (e. g. "Roer en Overmass" Waterboard dans la province du Limburg) appliquent une réglementation contraignante sur la base de mesures structurelles ou en encourageant le développement d'approches participatives grâce au soutien d'un budget spécifique.

En Belgique, un zonage de la sensibilité à l'érosion a été réalisé à l'échelle de la parcelle agricole sur la base de données à très haute résolution spatiales. Les agriculteurs voulant cultiver des parcelles sensibles ou se situant au dessus d'un certain seuil de pente (pour la Wallonie) doivent adopter des mesures de prévention.

1.5. PERSPECTIVES QUI SE DESSINENT DANS LA DIRECTIVE EUROPEENNE

1.5.1. La Directive

Partant du constat que la dégradation des sols s'est aggravée en Europe, la Commission introduisait le 16 avril 2002, une communication au Conseil Européen et au Parlement afin d'élaborer une politique européenne de protection des sols. Depuis, la Commission a émis le 22/09/2006 un projet de Directive Cadre sur la Protection des Sols, actuellement soumise aux Etats Membres car il n'y a pas de législation communautaire spécifique pour la protection des sols. Ce projet de Directive propose de répondre au besoin d'adopter une approche complète et intégrée à l'échelle européenne.

Les principaux documents de références sont :

La Communication (COM(2006) 231) qui explique en quoi il est nécessaire d'appliquer en Europe un haut niveau de protection, établit l'objectif général de la Stratégie et explique les types de mesures à prendre. Elle établit un programme de travail de 10 ans pour la Commission.

La proposition de Directive cadre (COM(2006) 232) qui établit les principes communs de protection des sols dans l'EU. Elle met les Etats Membres en position de décider comment protéger au mieux les sols et en développer un usage durable sur leur propre territoire.

L'étude d'Impact (SEC (2006) 1165 et SEC(2006) 620) qui contient une analyse des impacts économiques, sociaux et environnementaux des différentes options étudiées en phase préparatoire et des mesures finalement retenues par la Commission.

(Plus de détails sur <http://www.euractiv.com/en/environment/soil-protection-strategy-leaves-choices-member-states/article-158098>)

Tous ces documents correspondent à la première reconnaissance officielle de l'objet « sol » comme élément essentiel de l'environnement au même titre que d'autres composantes comme l'eau ou l'air.

Les principales menaces pesant sur les sols ont été identifiées en deux groupes :

- groupe A : l'érosion, le tassement, la baisse de matière organique et de la biodiversité, l'imperméabilisation des sols (notamment par urbanisation) et les glissements de terrain, enfin d'autres menaces comme la salinisation qui concernent moins nos régions.
- groupe B : les contaminations.

La directive prévoit trois niveaux : prévention, identification et actions.

La prévention regroupe les mesures préventives, l'intégration dans les politiques sectorielles et la prévention de la contamination.

Pour les Identifications, la Directive prévoit :

- Pour le groupe A - des dispositions préventives générales comme le recensement des zones exposées à un risque (dans un délai de 5 ans pour l'érosion : article 6) et la mise en place de mesures destinées à lutter contre cette menace (pour l'érosion article 8).- l'adoption d'objectifs de réduction des risques et l'établissement de programmes de mesures.
- Pour le Groupe B –contamination : - de recenser les sites contaminés, avec une enquête préliminaire à réaliser dans les 5 ans et une identification des sites contaminés en 25 ans, - de mettre en place une stratégie d'assainissement.

Dans les deux cas, l'identification des problèmes relèvera de l'obligation des Etats qui transmettront à la communauté dans un délai de 8 ans. Le choix des mesures sera laissé à la discrétion des Etats Membres, ce qui leur laissera une grande marge de manœuvre pour cibler les mesures et être efficace dans le contexte qui est le leur, pour assurer la promotion de l'utilisation durable des sols, et conduire la promotion d'une approche préventive dont la composante économique aura été bien prise en compte (Illustration 2).

Le calendrier provisoire de cette directive s'étend jusqu'à 2018 (Illustration 3).

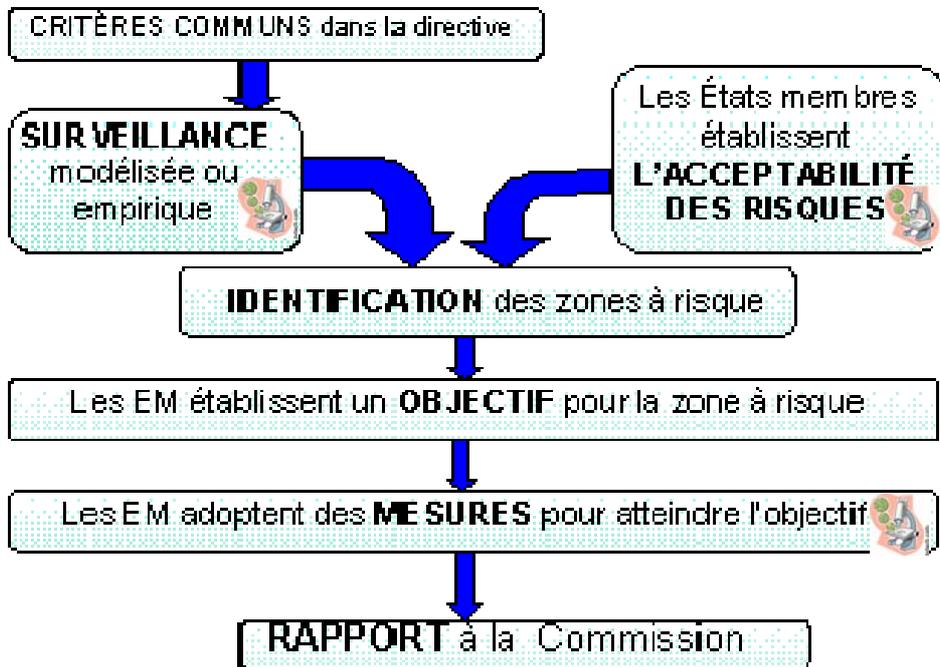


Illustration 2 : Processus d'intégration des objectifs des Etats Membres (source DG Env.)

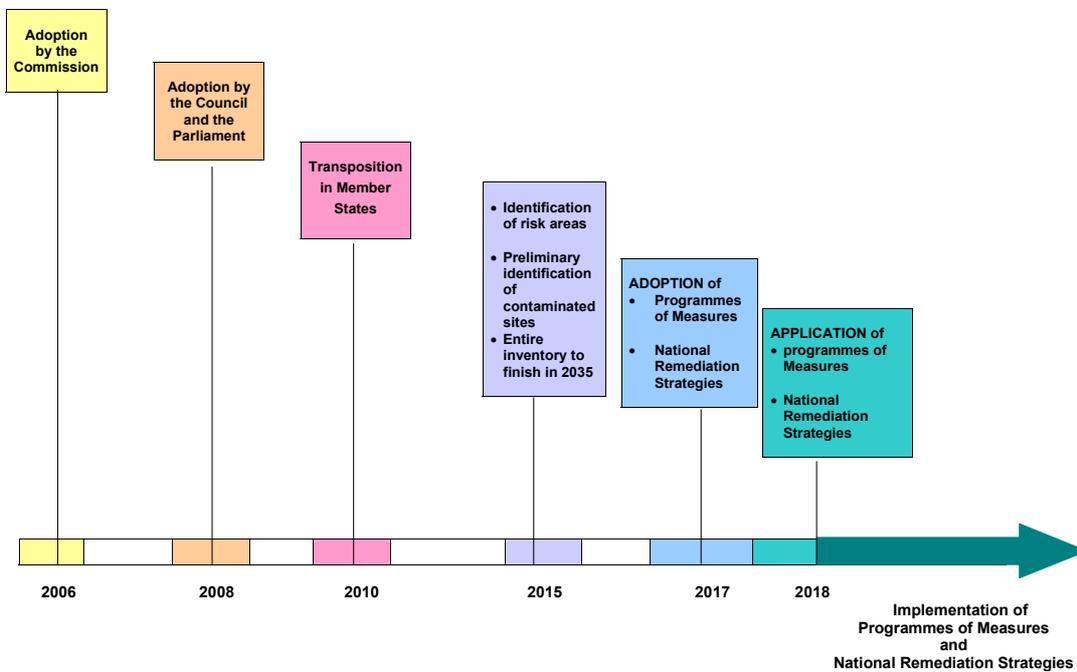


Illustration 3 : calendrier provisoire de la mise en place de la Directive (source DG Env.)

1.5.2. Les recherches à conduire

Des recherches en soutien aux politiques publiques vont donc être nécessaires pour assurer la mise en œuvre de cette Directive avec des outils et des méthodes adaptés.

Sur la base des recommandations issues de la consultation publique, les axes de recherche prioritaires proposés par la Commission sont :

- les processus qui sous-tendent les fonctions des sols
- les modifications spatiales et temporelles dans les processus relatifs aux sols
- les facteurs écologiques, économiques et sociaux qui génèrent la dégradation des sols
- les facteurs qui influencent les fonctions écologiques du sol
- les procédures et technologies pour la protection et la restauration des sols.

Ces Axes seront introduits dans le 7ème Programme Cadre (2007-2013) dans le domaine «Environnement» et «Alimentation, agriculture et biotechnologie».

Parmi les difficultés liées à l'établissement et au bon fonctionnement de cette Directive, quelques lacunes apparaissent déjà :

- **pour l'obligation de recensement** : la nécessité de disposer de façon exhaustive au plan spatial de paramètres sur les sols va être un problème récurrent. L'absence de données cohérentes peut être compensée par des solutions alternatives intégrant des sources de données diverses (cartes pédologiques, géologiques, autres), des méthodes innovantes de métrologie spatialisée in situ ou distantes, enfin des méthodes cohérentes de spatialisation de l'information.
- **pour le choix des mesures à mettre en place** : la visibilité est encore insuffisante. Sur les enjeux économiques relatifs à ces menaces, dont celle de l'érosion. Cette lacune a bien été mise en évidence lors de la réalisation du projet européen « Assessing economic impacts of soil degradation » mise en œuvre par Ecologic & le BRGM. Cette visibilité sera indispensable pour argumenter les choix de solutions techniques de réduction du risque érosif et leur efficacité économique.
- **Pour l'adoption d'objectifs de réduction des risques** et l'établissement de programmes de mesures : il n'y a pas à ce jour de programme de suivi temporel quantitatif de l'érosion en France. C'est une étape incontournable pour étayer les objectifs à fixer. Il y a un réel besoin de lignes de conduites et de coordination adaptées aux diverses situations.

2. Modélisation de l'érosion des sols

2.1. INTRODUCTION

L'étude des processus d'érosion se situe aux interfaces de domaines scientifiques variés et nécessite une approche multidisciplinaire. Les caractéristiques (i.e. l'érosivité) des précipitations et des écoulements de surface constituent le premier déterminant de la réponse érosive, qui affecte la qualité des eaux en y associant des sédiments et particules adsorbées (nutriments, pesticides, éléments traces métalliques ...), entraînant le cas échéant, la pollution des points de captage des eaux potables et l'eutrophisation des cours d'eau. Les caractéristiques pédologiques de la surface déterminent directement les processus de détachement qui entraînent la perte du capital sol et sa dégradation au travers de la perte d'éléments essentiels affectant ses propriétés physique et biochimiques. L'effet du relief qui affecte la nature et l'intensité de l'érosion, notamment au travers de facteurs comme la longueur, la convexité ou l'intensité de la pente. Enfin, en terrain agricole, les pratiques agricoles et les rotations culturales en interaction avec le climat participent à la dynamique saisonnière de l'érosion qui, sur les terres cultivées, représente une gêne pour le passage des engins dans les zones érodées, un obstacle à la levée des plantules dans les zones de dépôt et une baisse générale de rendement (qui est généralement compensée dans les zones où la profondeur de sol n'est pas limitante par l'ajout d'intrants supplémentaires, avec bien entendu toutes les conséquences environnementales que cela suppose).

Les facteurs et processus appartenant à ces différents domaines interagissent non linéairement dans l'espace et le temps, rendant complexe la formalisation des processus élémentaires de l'érosion. En effet, même si des progrès notables ont été réalisés ces dernières années dans l'étude des phénomènes d'érosion, des difficultés subsistent, les plus significatives étant liées à l'appréhension de l'hétérogénéité spatiale des matériaux étudiés, et à la non-linéarité de la réponse des processus de l'érosion aux forçages climatiques et anthropiques.

Afin de pouvoir apporter des solutions adaptées et effectives à ces problèmes de gestion durable de l'environnement et de conservation des sols, il est nécessaire de recourir à la modélisation. Elle fournit un cadre cohérent à la connaissance et permet de mettre à jour les différents points de blocages au niveau de notre appréhension des processus érosifs. Elle offre également la possibilité de tester des hypothèses de recherche pour certains aspects où l'expérimentation est difficilement réalisable. Enfin, une fois validée, elle peut servir d'outil de simulation pour évaluer l'impact de changements d'occupation du sol ou de changements climatiques, à condition que le rôle de chaque composant soit explicite.

2.2. LES VARIABILITES TEMPORELLES ET SPATIALES DES PROCESSUS D'EROSION DES SOLS

Les phénomènes érosifs ne se produisent pas uniformément dans le temps, mais évoluent soit de manière cyclique avec l'enchaînement des saisons et des cycles culturaux soit de manière plus aléatoire, au gré d'événements climatiques exceptionnels. De l'échelle de la saison à celle de l'événement pluvieux on retrouve une variation temporelle causée par les variations de cumul et

d'intensité des pluies et par la dynamique d'évolution de l'état de surface. Les connaissances qu'on possède sur la dynamique de formation des croûtes proviennent en grande partie d'expérimentations sous pluie simulée pour lesquelles on arrive à établir une relation entre l'évolution de la structure de surface, les caractéristiques des pluies simulées et la charge solide (concentration en sédiment du ruissellement). En conditions naturelles ces relations restent à établir.

A cette variabilité temporelle s'ajoute une forte variabilité spatiale. Le phénomène érosif se déclenche et se développe de différentes manières, selon les types de cultures ou les espaces géographiques affectés. L'hétérogénéité spatiale s'observe aussi à toutes les échelles. Sur les terres cultivées, les travaux du sol tendent à homogénéiser l'expression de certains paramètres comme la rugosité de surface ou le couvert végétal à l'échelle de la parcelle agricole. D'autres facteurs par contre, comme la texture ou la pente possèdent des lois de répartition propres.

Ces variabilités qui se retrouvent à l'échelle la plus fine entraînent une forte variabilité de la réponse érosive, même pour des mesures sur de petites surfaces à l'échelle de l'événement pluvieux. Nearing et al., (1999) sur la base de nombreuses données expérimentales provenant de parcelles avec répétitions, ont montré que les données de mesures d'érosion contiennent une large quantité de variance inexplicée. Cerdan et al. (2002b) ont aussi constaté qu'il restait une variabilité significative entre plusieurs répétitions ayant les mêmes caractéristiques.

A l'échelle du bassin versant élémentaire, les hétérogénéités spatiales, vont être à l'origine de la création dans le paysage d'une mosaïque de surface aux propriétés hydrologiques et pédologiques variées qui auront des réponses différentes au niveau de l'érosion. Ainsi l'organisation fonctionnelle topologique et l'aggrégation de ces différentes surfaces entraînent des processus de connectivité qui ont une influence directe sur la genèse et la concentration des écoulements.

2.3. PRESENTATION DES TYPES DE MODELES EXISTANT

Il existe une large palette de modèles pour simuler les processus de détachement et de transport de sédiments (et des polluants associés). Ces modèles diffèrent en termes de complexité, d'objectif, de description des processus élémentaires et de demande en données d'entrée. En règle générale il n'y a pas de modèle qui soit optimal pour toutes les applications. Le modèle le plus approprié dépendra de l'utilisation voulue, et des caractéristiques de l'environnement modélisé. Les autres facteurs influençant le choix d'un modèle pour une application inclus :

- La nature des données d'entrée (incluant les variations temporelles des entrées et sorties)
- La précision et la validité (incluant les hypothèses sous jacentes)
- Les composants du modèle, qui reflètent ses capacités
- Les objectifs de l'utilisateur (incluant ses capacités à prendre en main le modèle, la nature et l'échelle des résultats escomptés)
- Les besoins en ressource informatique

En général on classe les modèles en trois grandes catégories, en fonction des processus physiques décrits par le modèle, des algorithmes décrivant ces processus et de la dépendance du modèle aux données d'entrée :

- Empirique ou statistique
- Conceptuel
- A base physique

Les différences entre les modèles ne sont pas forcément tranchées et la distinction entre les différentes classes reste donc subjective. Il est possible qu'ils soient composés de modules qui mélangent les différentes catégories. Ainsi, le module infiltration-ruissellement d'un modèle de prédiction de la qualité des eaux peut être à base physique, alors que des relations empiriques sont utilisées pour le calcul du détachement et du transport de sédiment. Certains modèles peuvent aussi être décrits comme hybrides entre deux classes. Par exemple le modèle de ruissellement HYACRES (Jakeman et al., 1990 ; Jakeman et Hornberg, 1993) est un hybride empirique-conceptuel. La structure du modèle est conceptuelle par nature, consistant en un certain nombre de réservoirs, alors que le nombre et la configuration de ces réservoirs utilisés pour chaque bassin versant est déterminé par une procédure d'identification statistique.

Chaque type de modèles est développé en fonction d'un objectif, et aucun modèle ne peut donc être considéré le plus approprié dans toutes les situations. Le choix d'une structure de modèle dépend largement du type de fonction que le modèle aura à effectuer.

Dans la littérature, le choix des chercheurs pour un type de modèle par rapport à un autre reflète deux attitudes principales selon qu'ils privilégient les processus en jeu ou le résultat. Par exemple, Thorsen et al. (2001), considèrent « que la capacité de prédiction des modèles conceptuels et empiriques, en relation avec les études d'impact de pratiques agricoles visant à la conservation des sols, est peu fiable du fait de la nature semi-empirique de la description des processus ». D'autres auteurs répondent que des modèles simples conceptuels ou empiriques, quand ils sont utilisés dans les conditions pour lesquels ils ont été développés, peuvent être plus précis que des modèles possédant une structure plus compliquée (e. g. Ferro et Minacapilli, 1995 ; Letcher et al., 1999). Perrin et al. (2001) font remarquer que la surparamétrisation peut empêcher les modèles d'atteindre leurs performances potentielles. En effet, si les modèles comportant un grand nombre de paramètres ont tendance à mieux coller aux données observées pendant la période de calibration, cette tendance ne se confirme pas pendant la phase d'évaluation. D'autres part, les modèles plus simples tendent à être plus robuste, fournissant donc des résultats plus stables entre les différentes évaluations. Les modèles les plus complexes, qui considèrent un grand nombre de processus courent le risque de posséder un haut degré d'incertitude, associé aux nombreux paramètres d'entrées nécessaires, qui se transmet aux paramètres de sorties. Ces incertitudes peuvent contre balancer le bénéfice d'une meilleure représentation des processus. Un facteur pour déterminer la valeur d'un modèle est donc le rapport entre sa simplicité et son pouvoir explicatif (Steeffels et Van Cappellan, 1998).

2.3.1. Modélisation distribuée

Les modèles se distinguent également en fonction de la manière dont ils représentent la surface modélisée, c'est à dire si ils sont distribués, semi distribués ou non distribués. Traditionnellement les modèles avaient plutôt tendance à traiter l'espace simulé à l'aide de paramètres globaux représentatifs de toute la surface. Mais avec l'avancée des techniques et des Systèmes d'information Géographiques (SIG) les approches distribuées, qui reflètent la variabilité spatiale des processus au sein d'un espace géographique sont devenues plus accessibles.

Communément, les modèles distribués divisent l'espace simulé en mailles (souvent suivant une grille rectangulaire) pour lesquelles les calculs des paramètres élémentaires sont effectués, on parle de mode raster. Les modèles comprenant principalement des éléments linéaires (ruisseau...) divisent l'espace en vecteurs et polygones, on parle de mode vecteur, une combinaison des deux modes est aussi possible. Les modèles distribués ne sont pas sans soulever un certain nombre de problèmes, notamment l'augmentation du besoin en données d'entrée est plus important, l'effet de la résolution des mailles sur le résultat à l'exutoire. Les demandes en données d'entrée peuvent augmenter de manière considérable quand il s'agit de renseigner chaque maille par toutes les informations nécessaires. Les modèles distribués ne devraient inclure que les paramètres ou les variables pour lesquels on peut mesurer la répartition spatiale (Rustomji et Prosser, 2001).

Le choix entre un modèle distribué et un modèle non distribué dépend des résultats attendus du modèle et des interactions avec les possibilités d'aménagement de l'espace par les décideurs locaux. De plus en plus les aménageurs sont demandeurs d'information spatialisés sur la source des sédiments et polluants associés, ce qui nécessite l'application de modèles distribués.

2.3.2. Résolution temporelle

Une considération clé pour déterminer si un modèle est approprié à une application est la résolution temporelle avec laquelle l'utilisateur désire modéliser son événement. On peut distinguer deux tendances générales pour les modèles d'érosion. Les modèles à l'échelle de l'événement pluvieux ont été développés pour analyser la réponse d'un système au cours d'un événement. Pour chaque événement, la résolution spatiale du modèle est de l'ordre de la minute à l'heure. Les algorithmes qui décrivent ces processus ont souvent été élaborés pour des applications sur de petites parcelles ou des mailles d'un bassin versant. Une deuxième tendance est représentée par les modèles qui s'appliquent sur des résolutions temporelles plus grossières afin d'étudier des évolutions générales au cours du temps en fonction de changements intervenant sur le climat, la végétation ou les politiques d'aménagement de l'espace.

2.3.3. Exemples de modélisation à l'échelle régionale

Il n'existe en France que très peu d'initiatives d'évaluation de l'érosion à l'échelle régionale, la plupart des efforts de recherche se concentrant de l'échelle de la parcelle à l'échelle du bassin versant élémentaire. La principale étude de modélisation à l'échelle régionale qui a été appliquée sur toute la France puis déclinée sur le territoire européen a été réalisée à l'INRA par Le Bissonnais et al. (1998 ; 2002) qui ont développé une approche système expert basé sur quatre paramètres intégrateurs de la réponse érosive, l'occupation du sol, la pente, les caractéristiques pédologiques de surface, et les intensités et hauteurs de pluie moyennes. Cette approche a

comme point fort de se fonder sur une expertise très approfondie de l'influence et de la prise en compte des caractéristiques du sol sur l'évaluation des processus d'érosion. Gobin et al. (2004 ; 2006) ont réalisé pour l'Agence Environnementale Européenne une revue des différentes approches qui ont été utilisées pour évaluer l'intensité et la répartition spatiale des phénomènes d'érosion en Europe. De toutes les approches décrites, qui vont de l'interrogation d'experts sur leurs visions du phénomène (Oldeman et al., 1991), au modèle dit « à base physique » (Gobin et al., 2003). Les auteurs soulignent le potentiel de ce dernier type d'approche ; principalement du fait qu'elles prennent directement en compte l'effet des paramètres élémentaires et permettent donc d'effectuer toute une série de scénarios. Toutefois, Gobin et al. (2006) reconnaissent également les limites actuelles de l'application de ce type d'approche comme nous l'avons déjà exposé dans les paragraphes précédents.

La caractéristique commune à toutes ces approches reste malheureusement la difficulté d'effectuer une validation objective des prédictions due au manque de données à cette échelle et la très faible densité (voir, dans de nombreuses régions, l'absence totale) de sites de mesure et de suivi des phénomènes érosifs. Ce constat est d'autant plus réel que parmi les différentes initiatives nationales ou européennes actuelles de suivi de mesure de la « qualité » ou de la dégradation des sols, les efforts se concentrent sur des méthodologies d'observations systématiques dans l'espace et dans le temps (i.e. des mesures ponctuelles effectuées tous les x années au centroïdes de mailles prédéfinies) qui sont incompatibles avec un suivi de l'érosion.

2.4. CONCLUSIONS

De nombreuses recherches se concentrent sur la modélisation de l'érosion des sols. Différentes approches sont développées en fonction des objectifs d'utilisation ; de la gestion du paysage agricole à l'avancement des connaissances sur les processus hydrologiques et géomorphologiques complexes (DeCoursey, 1985; Foster, 1990; De Roo, 1993).

Dans le domaine des applications concrètes relevant de la gestion des terres agricoles, les modèles empiriques du type USLE (Universal Soil loss Equation, Wischmeier et Smith, 1978) sont certainement les plus employés. Mais malgré de multiples développements et améliorations, les limites inhérentes à ce type d'approche empirique globale n'ont pu être entièrement dépassées.

Les études plus récentes sur les processus de l'érosion ont notamment mis en avant la variabilité spatiale et temporelle des paramètres de surface. Pour pouvoir prendre en compte cette variabilité, les recherches en modélisation se sont tournées vers une approche plus déterministe basée sur la description des processus physiques au travers de modèles mathématiques (e.g. WEPP, Nearing et al., 1989 ; EUROSEM, Morgan et al., 1998) qui reflètent l'état d'avancement de la compréhension des processus d'érosion. L'avantage de ces types de modèles réside dans leur potentiel à décrire la dynamique des composants élémentaires de la réponse érosive. Par contre, une limite importante reste l'obtention des nombreuses données d'entrées nécessaires (Bryan, 2000). En plus des difficultés liées à la disponibilité de ces données s'ajoutent les problèmes liés à la surparamétrisation, et donc aux problèmes de propagation et d'accumulation des incertitudes (Beven, 2001). Des publications récentes sur l'évaluation de ces modèles sont peu encourageantes (Nearing et Nicks, 1998; Favis-Mortlock, 1998; Takken et al., 1999; Folly et al., 1999; Jetten et al., 1999), et amènent à considérer les prédictions avec un certain degré d'humilité (Boardman, 1998). Du fait des hétérogénéités spatio-temporelles des facteurs en cause et de leurs interactions, les modèles à base physique prenant en compte les processus élémentaires ont

recours à l'établissement de relations empiriques et effectuent diverses étapes de calibration qui, d'une certaine manière, peuvent remettre en cause le caractère déterministe du modèle (De Roo, 1996). Il n'est ainsi pas du tout évident que tous les processus qui interviennent dans l'érosion des sols et leurs interactions complexes puissent être modélisées physiquement (Parsons et al., 1997 ; Bryan, 2000).

Pourtant, grâce aux études menées depuis les années 1930 sur les relations entre les propriétés des sols et leur érodibilité, on commence maintenant à posséder une relativement bonne connaissance des différents facteurs et mécanismes impliqués dans l'érosion. Cependant ces connaissances s'appliquent plus particulièrement pour une description de l'érosion sur une petite surface à un instant donné. Le développement d'une formalisation qui arriverait à tenir compte explicitement des interactions entre les différents processus en jeu, mais surtout des variabilités spatio-temporelles des processus aux différentes échelles auxquelles ils se produisent représente donc actuellement un enjeu majeur de recherche. Cet enjeu se situe à la fois du point de vue de l'avancée des connaissances, mais aussi dans le sens où cela permettrait l'établissement d'approche de modélisation effective à même de répondre à une forte demande sociale. Cette approche se baserait sur une recherche des processus dominants à l'échelle de modélisation souhaitée en menant une réflexion sur le rapport entre la complexité et l'efficacité des modèles, en recherchant le compromis optimal entre la prise en compte des processus élémentaires de l'érosion, le nombre de variables nécessaires et leurs disponibilités.

Au vu des différents éléments apportés par ce chapitre, il apparaît donc qu'une approche de modélisation à l'échelle régionale, pour être opérationnelle dans les conditions de disponibilités de données et de connaissances actuelles doit plutôt privilégier une méthodologie qui se base sur :

- **Une approche distribuée,**
- **Une structure de modélisation simple et robuste,**
- **Un nombre limité de paramètres d'entrées intégrateurs dont l'effet global sur l'érosion est bien documenté.**

Enfin une attention particulière devra être apportée afin d'essayer de mettre en place une procédure de validation de la cartographie.

3. Présentation de la méthodologie

3.1. INTRODUCTION

Les discussions présentées au chapitre 2 montrent qu'une réflexion amont, appuyée sur plusieurs essais de développement d'approches de modélisation, a déjà été menée au sein de la communauté scientifique. Au niveau de la modélisation à l'échelle régionale, les pistes actuelles pointent essentiellement vers deux types d'approches, les approches plutôt déterministes (e.g. PESERA) ou les approches plus opérationnelles basées sur l'expertise et une vision intégratrice des processus en jeux. Au vu des limites énoncées sur le premier type d'approche en termes de la faible disponibilité actuelle des données d'entrées nécessaire, et au vu des premières applications effectués à l'aide des différentes approches (Le Bissonnais et al., 2002 ; Kirkby et al., 2004) notre choix s'est assez rapidement porté sur le deuxième type, et plus spécifiquement sur le modèle expert développé en France par l'INRA (Le Bissonnais et al., 1998).

Cette méthodologie a originellement été développée pour être appliquée sur la France entière. Avant de déployer le modèle sur les départements français, plusieurs points essentiels sont à creuser :

1. La structure du modèle est-elle la plus adaptée pour une utilisation à l'échelle départementale et ne peut-elle pas être améliorée par l'utilisation de technique plus élaborée ?
2. La méthode est-elle assez robuste pour être employée sur des situations contrastées ? Autrement dit : i) la sensibilité du résultat du modèle est-elle bien répartie entre les différents paramètres, et ii) les résultats restent-ils toujours cohérents même pour des valeurs un peu extrêmes des paramètres d'entrées ?
3. Quelle est la résolution la plus pertinente des différents paramètres d'entrée pour un bon compromis coût / qualité des prédictions ?
4. Il y a-t-il possibilité de valider les résultats obtenus ?

Dans ce chapitre nous nous pencherons essentiellement sur le premier point, tandis que les points suivants seront abordés dans deux autres rapports (Desprats et al., 2006 ; Surdyk et al., 2006) qui présentent des études de sensibilité du modèle sur deux départements contrastés, l'Hérault et l'Oise.

3.2. LA METHODOLOGIE ACTUELLE D'ESTIMATION DE L'ALEA EROSION

La méthodologie étudiée dans ce rapport a été développée par l'INRA lors d'une étude réalisée à la demande conjointe de l'Institut français de l'environnement (Ifen) et du ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement en 1998 (Ifen, 1998). Cette demande était motivée par les conclusions de "l'inventaire des coulées de boue entre 1988 et 1998" qui avait mis en évidence l'importance de l'érosion dans la plupart des régions de France bien au-delà des zones classiques de montagne ou de bordure méditerranéenne. La méthodologie a subi des améliorations et des réactualisations en 2002 (Le Bissonnais et al., 2002).

La méthode proposée par l'INRA se présente sous la forme d'un arbre de décision et permet de dresser une carte de l'aléa érosion en France. Les arbres de décision permettent de manière générale de croiser sous forme de combinaisons logiques certains paramètres pour obtenir une classification comme résultat final. Ces combinaisons logiques peuvent être binaires (oui/non) ou aboutir à plusieurs classes (Très peu/peu/etc.). Les classes ainsi que les règles de décision sont typiquement déterminées à dire d'experts (Figure 1). Les arbres de décisions ont déjà été utilisés pour l'élaboration de cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain (Shrestha et al., 2004.).

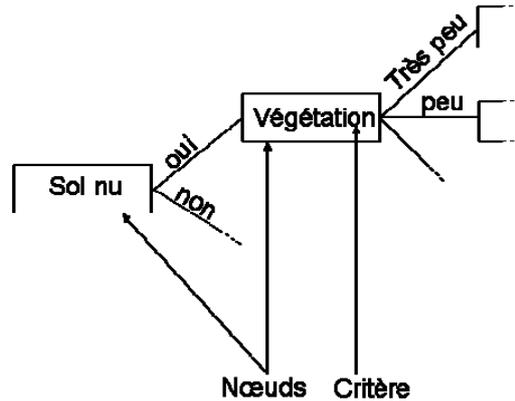
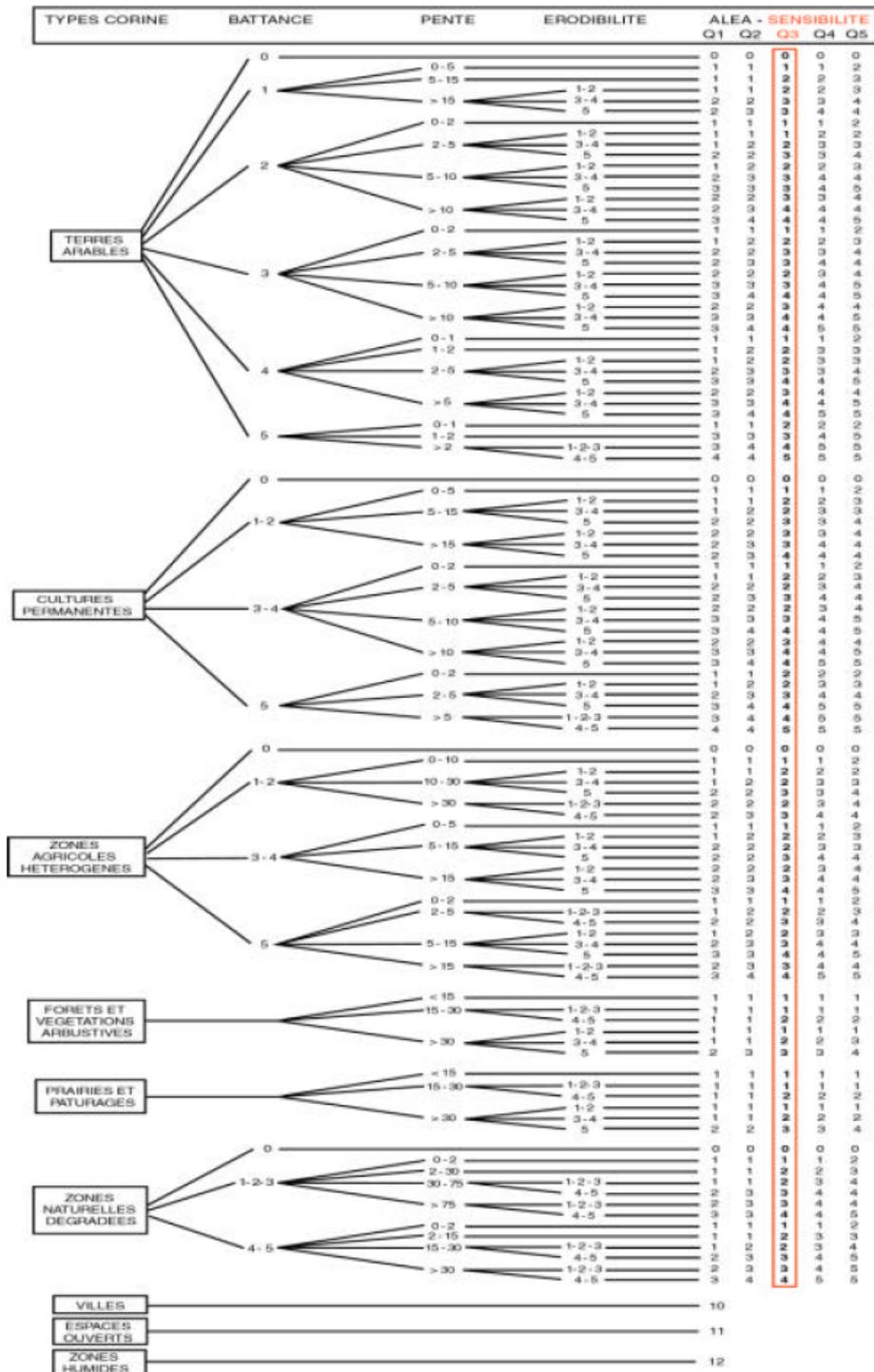


Illustration 4 : Exemple d'arbre de décision. L'arbre est composé de plusieurs nœuds ayant chacun un critère de décision.

La démarche méthodologique de l'INRA est basée sur l'hypothèse que quatre facteurs sont nécessaires et suffisants pour expliquer l'aléa érosion : i) le sol, ii) l'occupation des sols, iii) la topographie, et, iv) le climat. Sur la base de ces facteurs, cinq critères ont été jugés importants et ont été intégrés à l'arbre. Le choix des critères fut guidé par l'avis des experts impliqués dans le projet (Ifen, 1998) mais aussi par les disponibilités de certaines données (Illustration 5).



Pour chaque type d'occupation du sol (types Corine Land Cover reclassés en 9 catégories) sont donnés une sensibilité du sol à la battance (0 = sensibilité nulle, 1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyenne, 4 = assez forte, 5 = très forte), une classe de pente (en %), et une sensibilité à l'érodibilité du matériau parental (0 = érodibilité nulle, 1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyenne, 4 = assez forte, 5 = très forte).

Pour chacune des combinaisons de ces facteurs, la Sensibilité des terrains à l'érosion (Q3) ainsi définie, est augmentée ou diminuée en fonction d'un indice combinant intensité et hauteur des précipitations, classé en quintiles (Q1 = indice de précipitations faible, à Q5 = fort), afin d'obtenir un niveau d'aléa pour ces terrains (0 = aléa nul, 1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyen, 4 = assez fort, 5 = très fort). Ainsi, pour un aléa égal à 5, la possibilité de rencontrer des problèmes d'érosion sur ces terrains est très forte.

Exemple : sur des terres arables, lorsque la battance est assez forte (classe 4), que la pente moyenne est comprise entre 2 et 5%, que l'érodibilité est moyenne (classe 3 et 4), l'aléa érosif peut être faible (2) lorsque les pluies sont faibles (Q1), moyen, ou assez élevé (classe 4) lorsque les pluies sont fortes (Q5).

Illustration 5 : modèle arborescent pour le calcul de l'aléa érosion.

3.2.1. Le sol

Le facteur sol a donné lieu à deux critères : la battance et l'érodibilité des sols. La battance est une dégradation liée à l'instabilité structurale des sols en surface qui entraîne une diminution importante de l'infiltrabilité et de la rugosité des sols. Elle engendre une érosion diffuse lors du ruissellement puis, en cas de concentration des flux, la formation de ravines. L' "érodibilité" correspond à la stabilité et à la cohésion des sols, c'est-à-dire à leur résistance au cisaillement et à leur plus ou moins grande facilité à être mobilisés par le ruissellement. Chacun de ces deux critères de l'arbre de décision permet de classer les sols en cinq catégories allant de "peu battant" à "très battant" et de "peu érodible" à "très érodible".

Ces deux critères sont obtenus par l'agrégation de certaines caractéristiques du sol à l'aide de règles de pédo-transfert qualitatives. Dans le cas de la battance, la règle a été mise au point pour rendre compte conjointement de la texture dominante, de la texture secondaire et du matériau parental. La règle est basée sur le principe que les risques d'érosion sont d'autant plus forts que la cohésion est faible.

Les règles de pédo-transfert ont été appliquées à la carte des sols de France au 1/1 000 000^{ème} pour obtenir une carte de battance (Illustration 6) et une carte d'érodibilité. La carte des sols de France se présente sous la forme d'unités typologiques de sols dont les caractéristiques sont décrites pour un certain nombre de variables (nom du sol, texture de surface, etc...).

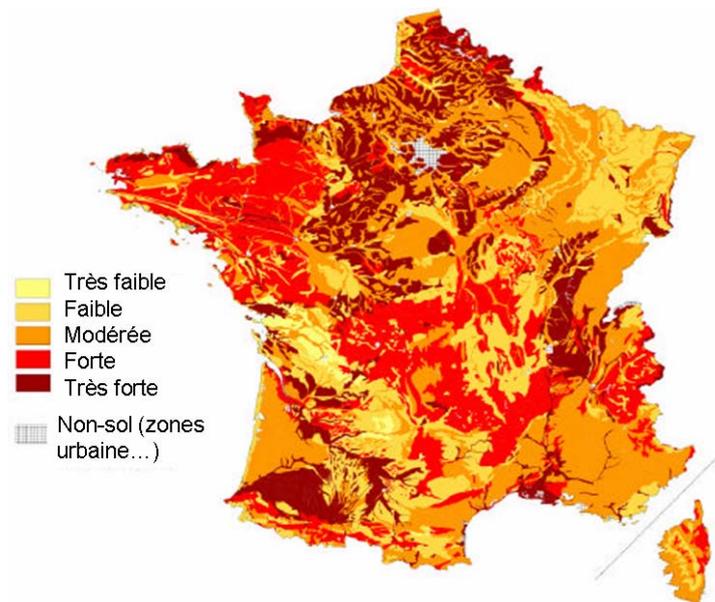


Illustration 6 : Sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance (d'après Le Bissonnais et al., 2002)

Il est à noter que les règles de pédo-transfert sont peu fiables si les associations de sol et de sous-sol sont très contrastées. Les auteurs ont par ailleurs fourni des informations sur l'incertitude associée avec l'estimation de l'aléa sous la forme de cartes de niveau de confiance. Ces cartes reflètent l'influence de l'hétérogénéité des sols sur l'estimation de la battance et de l'érodibilité. Moins le sol est homogène, moins le niveau de confiance est élevé.

3.2.2. L'occupation des sols

Le critère servant à rendre compte de l'occupation du sol repose sur la base de données cartographique CORINE Land Cover (*EEC, 1993*). Cette base de données des types d'occupation des sols a été établie à partir de différentes sources : des images satellitaires (Landsat, Spot), des cartes topographiques, des photos aériennes et des informations statistiques recueillies à l'échelle européenne.

Dans la base CORINE Land Cover, les types d'occupation des sols sont codés en trois niveaux hiérarchiques. Le premier différencie 5 grands ensembles : territoires artificialisés, territoires agricoles, forêts, zones humides et surfaces en eau. Le deuxième précise chaque classe et le dernier niveau détaille l'occupation des sols en 44 sous-types.

Pour la mise au point de l'arbre de décision, l'ensemble de ces sous-types n'a été pas retenu. Ils ont été regroupés en 9 nouvelles classes en fonction de leur comportement vis-à-vis de l'érosion des sols. Le critère d'occupation des sols permet donc un classement en 9 catégories (Illustration 7).

Nom de la catégorie	Description
Terres arables	Espaces pouvant être à nu pendant une période plus ou moins longue au cours de l'année
Prairies et pâturages	Espaces protégeant la surface et favorisant l'infiltration
Zones agricoles hétérogènes	Espaces regroupant des unités assez différentes mais formant des paysages contrastés : parcellaire morcelé et diversifié, alternance de prairies, terres cultivées et bois. Cette diversité est un facteur limitant le ruissellement par rapport aux espaces ouverts comme les terres arables
Cultures permanentes	Espaces regroupant les vignes et les vergers aux comportements érosifs similaires
Forêts et les zones arbustives	Espaces peu sensibles à l'érosion sauf sur des pentes très fortes et des terrains instables
Zones naturelles dégradées	Espaces en mutation par disparition de la végétation (végétation clairsemée ou zones incendiées). Ces espaces peuvent être très sensibles à l'érosion sur des matériaux instables, car les sols peuvent être mis à nu sur des pentes parfois très fortes (bad- lands)
Espaces ouverts	Espace sans végétation : roches nues, glaciers et plages
Zones d'eau libre	Mers, lacs, rivières, et zones humides (marais et rizières)
Territoires artificialisés	Espaces pour lesquels les processus érosifs dépendent des aménagements réalisés et ne peuvent pas être pris en compte dans le cadre de cette étude. Ils regroupent les zones urbanisées et industrielles, les espaces verts urbains et les mines

Illustration 7 : Description des 9 catégories d'occupation du sol utilisées dans la méthodologie actuelle (d'après Le Bissonnais et al., 2002)

3.2.3. La topographie

Le critère de topographie est basé sur des calculs de pentes. Le modèle numérique de terrain (MNT, source IGN) donne l'altitude moyenne de mailles carrées de 250 m pour l'ensemble de la

France. La pente moyenne de chaque maille (en pourcentage) a été calculée à partir de la différence d'altitude entre une maille et ses huit voisines. La pente est divisée en huit classes dont les seuils ont été choisis en fonction de connaissances de terrain ou de valeurs issues de la littérature (Illustration 8).

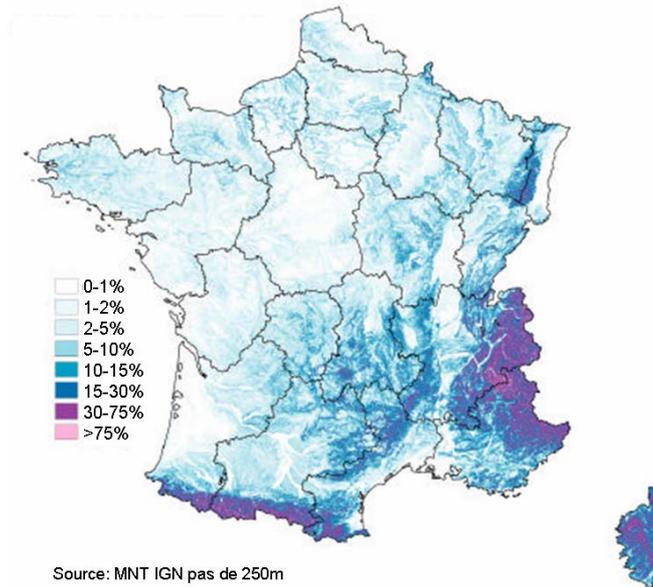


Illustration 8 : Classes de pentes (d'après Le Bissonnais et al., 2002)

La taille de la maille du MNT (250 × 250 m) a servi à définir l'échelle de définition de la carte de l'aléa érosion. Cette définition offre un bon compromis entre la précision requise pour ce travail et le volume des données à traiter.

3.2.4. Le climat

Le facteur climatique a donné lieu à un critère pluie car les précipitations sont généralement considérées comme un des tous premiers facteurs de déclenchement des phénomènes érosifs. Le potentiel d'érosion de la pluie dépend essentiellement de son volume et de son intensité. Une agrégation de ces deux paramètres a été réalisée afin que la pluie ne donne lieu qu'à un seul nœud dans l'arbre de décision.

Les hauteurs de précipitations moyennes sur une trentaine d'années fournies par les stations de Météo France ont été utilisées. Le nombre de stations disposant de chroniques assez longues n'étant pas suffisant pour être représentatif de toutes les spécificités géographiques françaises, la représentativité des pluies a dû être améliorée par l'utilisation de la méthode AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydrométéorologie). Cette méthode permet de cartographier les pluies en tenant compte de la valeur réelle mesurée par la station météorologique et des particularités topographiques de chaque point (*Benichou & Le Breton, 1987*). La méthode AURELHY peut s'appliquer à des pluviométries statistiques à n'importe quelle région de France avec une maille de 5 km. Les valeurs de hauteurs de précipitations moyennes ont ensuite été reclassées en quintiles normalisés pour chaque saison climatique.

L'intensité des pluies est jugée par la fréquence moyenne par saison de hauteurs de pluies supérieures ou égales à 15 mm en 1 heure. Ce choix, bien que subjectif, offre un compromis entre la précision nécessaire et une discrimination suffisante pour faire ressortir les fortes intensités des pluies de la zone méditerranéenne. Les valeurs de fréquences ont été regroupées en trois classes, correspondant à des seuils d'intensités : "faible", "moyenne" et "forte".

Pour tenir compte à la fois des hauteurs et des intensités de précipitations, la carte des hauteurs de précipitations a été croisée avec celle des intensités suivant la logique suivante :

- lorsque l'intensité est faible, la classe d'agressivité reste identique à celle des hauteurs de pluies ;
- lorsque l'intensité est moyenne, la classe d'agressivité est augmentée d'un niveau par rapport à la classe des hauteurs ;
- lorsque l'intensité est forte, la classe d'agressivité est augmentée de 2 niveaux.

La valeur 5 est le maximum possible ainsi la carte pouvant prédire l'agressivité du climat est divisée en 5 catégories. (Illustration 9)

Classe sur la base de l'intensité →	intensité faible	intensité moyenne	intensité forte
Classe sur la base du volume ↓			
1	1	2	3
2	2	3	4
3	3	4	5
4	4	5	5
5	5	5	5

Illustration 9 : Croisement des classes d'intensité et des classes de volume des pluies pour obtenir les classes d'agressivité du climat.

3.2.5. La hiérarchisation

Les critères de pente, d'occupation des sols, d'agressivité du climat, d'érodibilité des sols et de susceptibilité à la battance ont été hiérarchisés à partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs et selon un ordre privilégiant les facteurs sur lesquels les activités humaines peuvent avoir une influence.

Ainsi, les critères apparaissent dans l'arbre de décision dans l'ordre suivant : 1) occupation des sols; 2) battance; 3) pente; 4) érodibilité des terrains et 5) agressivité du climat.

Le croisement des quatre premiers critères permet de définir la sensibilité intrinsèque des terrains à l'érosion. L'évaluation de l'aléa moyen d'érosion saisonnier est obtenue par croisement de la sensibilité potentielle avec l'agressivité du climat de chaque saison.

3.3. ANALYSE CRITIQUE DE L'ARBRE DE DECISION

La cartographie de l'aléa "Erosion de sols" de France s'est déroulée en trois étapes i) une identification des facteurs pouvant avoir une influence sur le phénomène ii) une détermination des critères de choix possibles pour chacun des facteurs et iii) une représentation de l'enchaînement des décisions et des événements sous forme d'un graphe logique. Ces opérations ont abouti à la création d'un arbre de décision.

3.3.1. Les Avantages des arbres de décisions

Les arbres de décisions permettent de classer un grand nombre d'échantillons en un faible nombre de classe. Dans l'exemple du modèle érosion, le résultat est donné sous la forme d'un ordonnancement en 5 classes. Cette simplicité dans la lecture des résultats est un point fort de cette démarche, car dans le cadre de la prise de décision, elle peut aboutir au traçage d'une carte de résultats facilement compréhensible.

Les arbres de décisions sont qualifiables de "boîte blanche" dans le sens où ils sont explicables sur la base de la logique booléenne. La simplicité de construction des arbres est un atout lorsque que les phénomènes à décrire sont trop complexes (*Shan et al., 2006*). Les cheminements aboutissant aux résultats des arbres de décisions peuvent facilement être vérifiés car les nœuds peuvent être lus dans les deux sens. Si un résultat semble incohérent, une remontée dans l'arbre permet de retrouver facilement quel critère est à l'origine des problèmes. La méthode, au-delà de sa visibilité, est très rapide d'utilisation car un seul chemin est parcouru pour chaque cas. Ceci est un avantage lorsqu'un grand nombre de données est à traiter.

Les arbres de décisions fournissent des résultats qualitatifs uniquement. En revanche ils peuvent agréger des critères quantitatifs ou qualitatifs. Cette caractéristique est importante dans le cadre de la cartographie de l'aléa érosion car la pente (variable continue) et le couvert végétal (variable qualitative) sont des variables très dissemblables rentrant en compte dans le calcul de la sensibilité potentielle des terrains à l'érosion.

Par ailleurs, les arbres ne sont pas affectés par les différences d'échelles de mesures des critères quantitatives car les critères ne sont pas combinés entre eux de manière arithmétique. Les arbres ne demandent donc pas de cohérence dans les unités durant la construction ou l'utilisation.

Les arbres de décisions n'ont pas besoin d'être paramétrés car s'ils ont été bien conçus, aucune variable ne doit être difficilement accessible. Les décisions doivent pouvoir être prises avec un minimum de recherches et de calculs. Cette caractéristique est un autre point fort dans le cadre de la cartographie de l'aléa érosion car le modèle doit être appliqué à l'échelle de la France, il doit pouvoir être utilisable malgré les diversités de la géographie et de la disponibilité des données.

3.3.2. Les inconvénients des arbres de décisions.

Les arbres sont basés sur des suites de décisions, chacune des décisions devant être prise en testant un seul critère. Ceci peut représenter un lourd inconvénient lorsque le nombre de critères entrant en compte dans un phénomène est important car la taille de l'arbre peut alors nuire à sa lisibilité.

Ce désavantage peut être amoindri si le critère testé n'est pas une variable simple mais résulte d'une combinaison de variables (ex: battance = nature + texture du sol). La combinaison de variables permet de ne pas allonger l'arbre démesurément mais peut tout de même nuire à sa lisibilité. En effet, si les méthodes adoptées pour combiner les variables des critères sont trop complexes, certains des nœuds deviennent des "boîtes noires" et ne sont plus lisibles rapidement.

Le problème majeur des arbres de décisions est qu'ils sont basés en règle générale sur des dires d'experts forcément sujets à discussion. L'arbre aurait certainement été différent si d'autres experts avaient été consultés.

De plus, les critères et les valeurs seuils étant basés sur les avis de plusieurs experts, ils sont souvent l'image d'un consensus entre les différents intervenants. Ceci conduit à un lissage des connaissances des experts et donc à une certaine diminution de leur qualité.

La détermination de l'aléa par un arbre de décision est au final subjective et soumise à une certaine incertitude.

La subjectivité des arbres de décision liée au faible nombre de résultats expérimentaux disponibles dans le cadre de la détermination de l'aléa érosion font que la validation de l'arbre est presque impossible. Les solutions néanmoins envisageables pour évaluer la pertinence de l'arbre sont l'expertise par un autre groupe d'experts ou des comparaisons de résultats avec des méthodes alternatives, par exemple la modélisation.

Un autre inconvénient des arbres de décisions est qu'ils sont bâtis comme une suite de décisions inter-dépendantes, chacune des décisions dépendant des décisions prises précédemment. La possibilité d'ajouter ou de retirer des nœuds après la validation de l'arbre est impossible car les critères et les seuils sont tous reliés entre eux. La modification de la valeur seuil d'une décision d'un nœud peut par exemple avoir une influence sur le reste de l'arbre.

En d'autres termes, si de nouvelles données doivent être intégrées, la construction d'un nouvel arbre est nécessaire. Ceci est un gros inconvénient car cela signifie que cette méthode ne pourra pas facilement s'adapter dans le cas où un autre critère serait jugé important après la validation du modèle.

Dans le cadre de la cartographie de l'aléa érosion des sols, des changements dans les règles de pédo-transferts pourront permettre une certaine adaptabilité du modèle en cas d'amélioration des connaissances des phénomènes de battance et de l'érodibilité mais les possibilités d'amélioration de l'arbre qui a été défini restent limitées.

Les arbres peuvent être vus comme des successions de classement. Or, chaque création de classe entraîne l'existence d'un "effet seuil". Pour les valeurs proches du seuil, une faible variation peut entraîner, en cas de changement de classe, une forte variation du résultat final puisque une branche différente de l'arbre est choisie. A l'inverse, une forte variation mais à l'intérieur de la même classe, n'aura aucun effet sur le résultat. Les arbres associant divers classements, les effets seuils peuvent se cumuler. Cet effet seuil est un inconvénient dans le sens où des cas ayant des valeurs de paramètres proches peuvent avoir des classements très différents.

3.4. ALTERNATIVES ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION

3.4.1. Les modèles déterministes ou empiriques

Une alternative possible aux arbres de décision est d'utiliser des modèles, déterministes ou empiriques, pour réaliser la carte de l'aléa érosion. Un grand nombre de modèles décrivant les phénomènes érosifs sont disponibles. Ceux qui ont fait l'objet du plus d'attention sont ceux basés sur l'Universal Soil Loss Equation (USLE ; *Wischmeier & Smith, 1978*), ANSWERS (*Beasley et al., 1980*), KINEROS (*Smith, 1981*) et WEPP (*Nearing, 1989*). L'USLE a une base empirique tandis que les autres modèles cités ci-dessus sont déterministes.

Les modèles déterministes essaient de relier des paramètres mesurables et des phénomènes physiques de façon rigoureuse. Le calcul de l'érosion fait donc intervenir un grand nombre de facteurs et de relations mathématiques. Le choix d'un modèle se fait en fonction de la problématique propre à chaque utilisateur (Illustration 10).

Modèle	1D	2D	En régime permanent	En régime non permanent	Erosion par événement	Erosion continue	Avec érosion en ravine	Sans érosion en ravine
ANSWERS	*		*		*			*
CREAMS	*		*		*		*	
WEPP	*		*			*	*	
KINEROS	*			*	*			*
RUNOFF	*			*	*			*
CASC2D-SED		*		*	*			*
SEM		*		*		*		*

Illustration 10 : Présentation de quelques modèles déterministes permettant de simuler l'érosion des sols. Chacun a des caractéristiques propres répondant à des besoins des utilisateurs.

Un modèle déterministe peut servir de base à la création d'une nouvelle méthodologie pour la cartographie de l'érosion (Illustration 11). Pour cette méthodologie, une gamme de sol, une gamme de climat et une gamme de couverts végétaux sont sélectionnées et traduites en ensemble de paramètres pour le modèle. Considérer un ensemble exhaustif des combinaisons climats/sols/couverts végétaux est difficilement envisageable car trop exigeante en temps. Des choix de climats, de sols et de couverts végétaux représentatifs de zones régionales doivent être faits en concertation avec des experts des différentes disciplines.

Les trois ensembles de paramètres obtenus sont croisés entre eux grâce au modèle déterministe. Un grand nombre de simulations est réalisé. Les résultats des simulations sont ensuite partagés en classes soit à dire d'expert soit par des classifications de type "Cluster analysis". En comparant les combinaisons de paramètres et les classes obtenues, un arbre de décision basé sur les règles de décision du modèle déterministe pourra être dressé. De nouvelles bornes issues de calculs déterministes seront obtenues laissant moins de place à la subjectivité. Pour chaque nouvel échantillon, l'arbre de décision sera utilisé comme s'il avait été conçu sous avis d'expert.

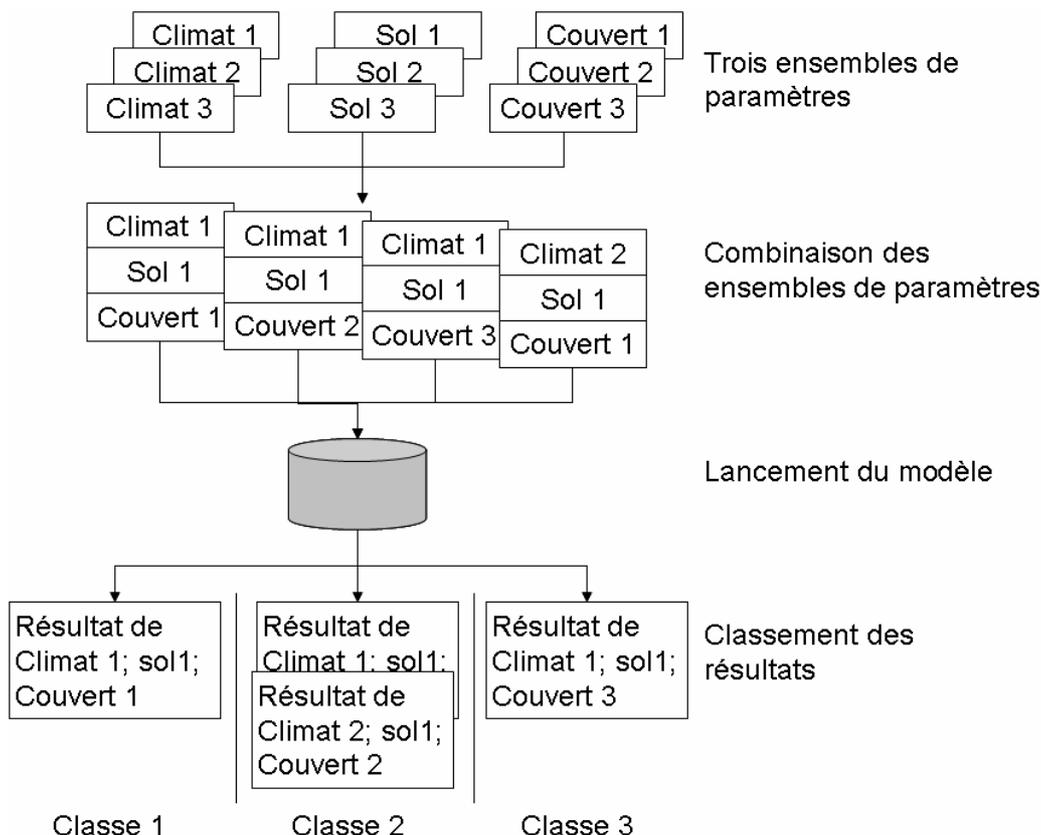


Illustration 11 : Exemple d'utilisation d'un modèle déterministe pour la classification de l'aléa érosion. Des ensembles de paramètres de sol, de climat et de couverts végétaux sont combinées pour générer un grand nombre de simulations.

Un inconvénient de cette méthodologie est qu'aucun modèle déterministe de prédiction de l'érosion ne fait l'unanimité. Le choix du modèle sera particulièrement important pour la lisibilité et la crédibilité des résultats.

De plus, les modèles déterministes sont d'une utilisation peu aisée, difficile à mettre en œuvre et très demandeurs en données d'entrées qui ne sont généralement disponibles que sur des bassins versants expérimentaux (cf. discussion chap. 2). Un autre inconvénient de cette méthodologie est le temps pris par son déploiement. Une fois le choix des climats, des sols et des couverts végétaux pris, la traduction de toutes les données en paramètres pour le modèle est longue. A ceci s'ajoute le temps de simulation de tous les croisements de paramètres. Compte tenu de ces contraintes, cette nouvelle méthodologie ne pourra pas se faire dans le cadre de cette étude. Elle pourra être envisagée dans le cadre d'une étude complémentaire dédiée.

Une des approches envisageables pour améliorer l'arbre de décision existant est d'intégrer pour certains nœuds des relations ou des modules provenant de modèles empiriques ou déterministes.

L'arbre de décision pourrait être amélioré si une partie des facteurs influençant l'érosion était simulée par un modèle déterministe. Les sorties du modèle seraient alors des entrées de l'arbre de décision. Cette approche est toutefois difficilement envisageable car les modules des modèles

déterministes sont en général interconnectés, l'obtention de résultats nécessite l'utilisation du modèle dans son ensemble. (Aksoy & Kavvas, 2005). Ainsi, l'utilisation de certains modules spécifiques des modèles déterministes n'entraîne pas une baisse du nombre de valeurs nécessaires pour faire tourner le modèle. Compte tenu de la diversité géographique des facteurs influençant l'érosion, cette approche nécessite un nombre trop important de valeurs pour chaque paramètre.

Les modèles déterministes ne peuvent pas être utilisés pour la cartographie de l'aléa érosion à l'heure actuelle car le nombre de valeurs disponibles à l'échelle nationale n'est pas suffisant. Ces modèles pourront améliorer les nœuds de l'arbre lorsqu'un nombre important de résultats expérimentaux pourra être rassemblé.

3.4.2. Les analyses multicritères

Les méthodes d'analyse multicritère sont des outils d'aide à la décision développés afin de permettre aux décideurs de choisir ou d'évaluer plusieurs solutions ou scénarios de gestion alternatifs. L'objectif de ces analyses est de fournir aux utilisateurs des aides à la décision dans des contextes où aucune des possibilités envisagées n'est parfaite et où les critères de choix sont multiples. Le principe de base de ces approches est de considérer tous les critères de sélection et de leur attribuer un poids lié à leur importance relative. Les résultats sont obtenus par agrégation des poids et des valeurs de chaque critère. Dans le cadre de la présente étude, les critères de l'analyse pourraient être la pente et l'agressivité des pluies. Les différentes analyses multicritères développées diffèrent dans leurs méthodes d'attribution des pondérations et dans leurs calculs d'agrégation.

Les réseaux de neurones

Par analogie avec le cerveau humain, les réseaux de neurones sont une technique de modélisation par apprentissage largement utilisée ces dernières années (De la Rosa et al, 1999; Turk et al, 2001; Ramadan, 2005). Ils proposent une simulation du fonctionnement de la cellule nerveuse (neurone biologique) à l'aide de fonctions mathématiques élémentaires plus ou moins complexes (neurone formel).

Les réseaux neuronaux sont constitués de plusieurs couches de neurones formels qui sont connectés entre eux par des liens mathématiques permettant de propager les calculs de neurone à neurone et de couche en couche. Localement, chaque neurone réalise une combinaison des valeurs des nœuds auxquels il est connecté, pondérée par le poids des connexions. Généralement, entre la couche d'entrée servant d'interface et de la couche de sortie donnant les résultats se trouve une ou plusieurs couches, dites cachées (Illustration 12).

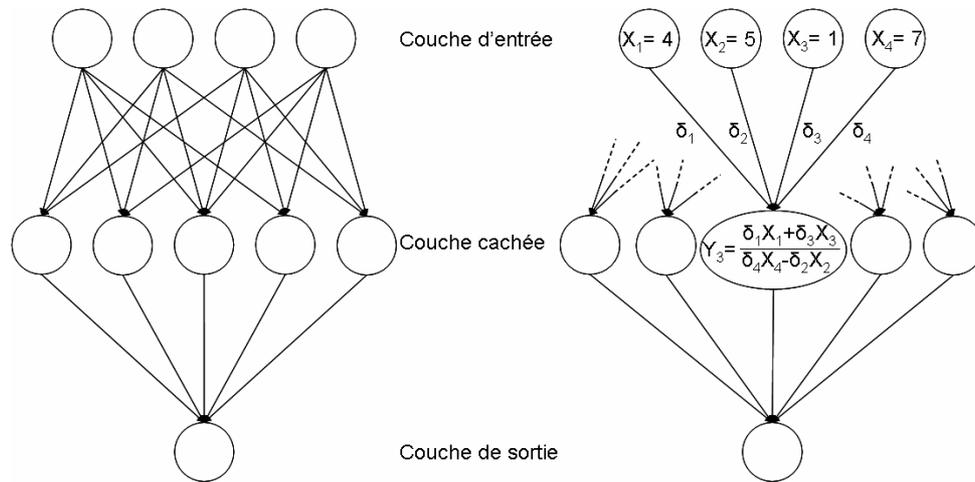


Illustration 12 : Représentation schématique du fonctionnement d'un réseau de neurone. Le neurone Y_3 réalise une combinaison des valeurs des nœuds (X_n), pondérée par le poids des connexions (δ_n).

Un neurone biologique est capable de modifier ses réactions en fonction des expériences. De la même manière, les réseaux de neurones partent d'un premier modèle aléatoire et vont utiliser une base de données comportant des résultats mesurés expérimentalement pour ajuster progressivement les poids de leurs connexions. Cette phase où le modèle s'améliore de lui-même est appelée phase d'apprentissage par analogie avec le comportement d'un cerveau humain. Le cycle d'apprentissage s'arrête lorsque les performances ne s'améliorent plus.

La base de données utilisée durant la phase d'apprentissage comporte les valeurs mesurées de certains paramètres (par exemple, la pente, le couvert et le type de sol) lié aux résultats expérimentaux (par exemple, le volume de sol perdu) de plusieurs échantillons.

Grâce à leur capacité d'apprentissage, les réseaux de neurones permettent de découvrir des relations complexes non-linéaires liant un grand nombre de variables. Aucune des relations à découvrir n'ayant besoin d'être connu a priori par les expérimentateurs, l'apprentissage se fait de manière automatique sans l'intervention de l'utilisateur. Ceci est un grand avantage dans le cadre de la cartographie de l'aléa érosion car les poids attribués à chaque paramètre ne seraient pas issus de jugements d'experts et ne seraient donc pas soumis subjectif.

Les réseaux de neurones ont des avantages en commun avec les arbres de décision. Bien que prenant en compte des relations très complexes, les réseaux de neurones sont très rapides pour fournir des résultats une fois que leur phase d'apprentissage est achevée. Ils peuvent également agréger des index quantitatifs et qualitatifs aux variations complexes. Ainsi, ils sont capables de produire des résultats à partir de jeux de données sans soucis d'échelle ou de nature. Les réseaux de neurones, tout comme les arbres de décisions, demandent moins de paramètres d'entrée que les modèles déterministes.

Les réseaux de neurones ont donc certains des avantages des arbres de décisions tout en étant moins subjectifs et semblaient convenir dans le cadre de cette étude. Pourtant, certaines de leurs caractéristiques freinent leur déploiement dans le cadre de la cartographie de l'aléa érosion.

Le processus de mise en place d'un réseau de neurones reste opaque et les relations générées sont le plus souvent inintelligibles pour l'utilisateur. Ceci n'est pas un problème en soi mais peut devenir gênant pour la lisibilité et la crédibilité des cartes lorsque les concepteurs du réseau sont des non-spécialistes (*Licznar & Nearing, 2003*).

De plus, dans le cas de la cartographie de l'aléa érosion les résultats du réseau de neurones doivent être présentés sous la forme de classe, les problèmes relatifs aux "effets seuils" entre les classes restent les mêmes que pour toutes les autres méthodes et un expert devra donner un avis pour fixer la valeur de ces bornes.

Par ailleurs, il est très difficile de déterminer quelle sera l'architecture optimale du réseau et plus l'architecture sera complexe, plus le risque d'obtenir des modèles non généralisables sera important. Il existe néanmoins de plus en plus d'outils pour aider à la construction des réseaux.

Globalement, les réseaux de neurones sont de bons outils pour construire des prédicteurs à partir de l'analyse de valeurs expérimentales, ils ont déjà été utilisés pour prédire l'érosion à petite échelle mais les auteurs disposaient d'une large base de données lors de la phase d'apprentissage. A grande échelle, les réseaux de neurones semblent être prometteurs mais la qualité de la base de données reste un problème (*Neaupane & Achet, 2004 ; Ermini et al., 2005*). Ainsi, le principal frein à l'utilisation de réseaux de neurones dans le cadre de la cartographie de l'aléa érosion en France est le manque de résultats expérimentaux. La phase d'apprentissage du réseau sera réduite et peut-être insuffisante. En d'autres termes, les résultats prédits par le modèle après son apprentissage seront peut-être inutilisables. De plus, une étude réalisée pour comparer l'approche arbre de décision et l'approche réseau de neurones n'a pas démontré de réelle supériorité d'une des méthodes par rapport à l'autre (*Ellis, 1996*).

Les apports de la logique floue

La logique floue est une méthode qui permet de ne pas ranger les objets dans des classes selon un système booléen mais selon des degrés d'appartenance. Cette approche autorise donc une plus grande flexibilité dans les systèmes de classification.

A titre d'illustration, si un arbre de décision considère que la pente favorise l'érosion pour des valeurs supérieures à 3%, alors lorsqu'une pente mesurée expérimentalement sera de 2,9%, le système booléen la classera comme ne favorisant pas l'érosion. Pourtant, 2,9% est très proche de 3% surtout en tenant compte de toutes les erreurs expérimentales qui ont pu être faites lors du calcul de la pente (Illustration 13).

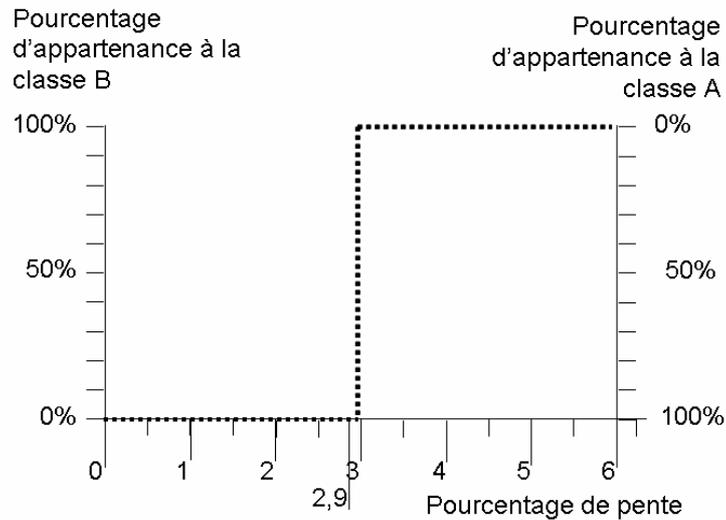


Illustration 13 : Dans un système booléen une valeur ne peut appartenir qu'à une classe. Ici, la valeur 2,9 bien que très proche de seuil est à 100% dans la classe A et à 0% dans la classe B.

La logique floue permet de limiter ces paradoxes en n'attribuant pas de limite fixe entre les classes. Par exemple, si le modèle considère qu'en dessous de 2,5% la pente ne favorise pas l'érosion et qu'au dessus de 3,5% la pente la favorise, alors une pente de 2,9% va favoriser l'érosion à hauteur de 55% et ne va pas la favoriser à hauteur de 45% (Illustration 14).

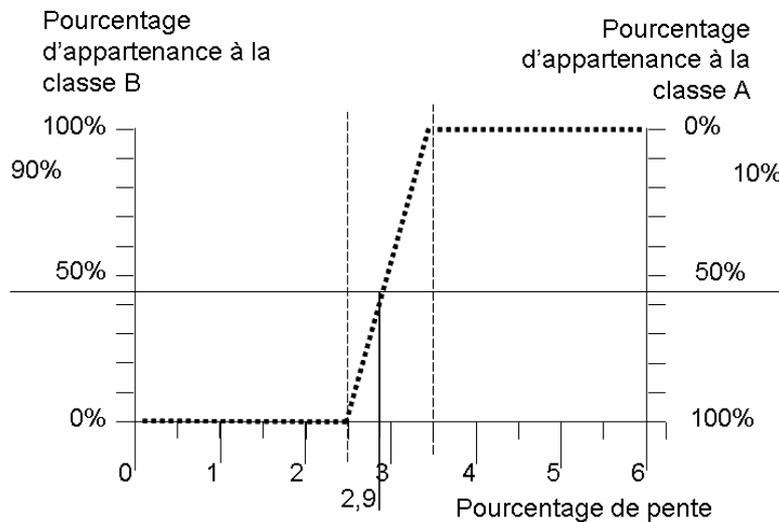


Illustration 14 : Lorsque la logique floue est utilisée, une valeur peut appartenir à plusieurs classes. Ici, un échantillon ayant une valeur de 2,9 appartient à 55% à la classe B et à 45% à la classe A.

La logique floue permet de limiter l'influence de ces seuils sur le résultat final. La logique floue permet aussi de rendre compte des désaccords entre experts. Si un expert donne la valeur de 2,5% de pente et un autre une valeur de 3,5%, l'utilisation de la logique floue permet d'utiliser ces

deux valeurs dans le modèle. Les avis de plusieurs experts peuvent ainsi être valorisés, la recherche d'un compromis pour fixer la valeur seuil n'est plus nécessaire.

Les variations autour des valeurs seuils ont moins d'effet grâce à la logique floue car il y a moins d'effet seuil. Une faible variation ne peut plus entraîner un changement total de classe et a donc une influence plus limitée sur le résultat final. L'influence des erreurs expérimentales est aussi amoindrie.

Cette approche présente notamment de l'intérêt dans le cas du couvert végétal car la plupart des mailles n'ont pas 100% de leur surface recouverte par la même végétation. Grâce à la logique floue, chaque maille verrait son appartenance séparée entre plusieurs classes ce qui permettrait de mieux rendre compte des hétérogénéités locales d'occupation des sols.

Dans le domaine de la cartographie de l'érosion à relativement haute résolution, des études publiées ont insisté sur le caractère intéressant de la logique floue, sur son déploiement aisé dans la plupart de logiciel de SIG (*Metternicht G. & Gonzalez S., 2005*) et sur la possibilité d'utiliser la logique floue quand les données sont en nombre restreint ou de mauvaise qualité (*Mitra et al., 1998*). La logique floue a déjà été appliquée à l'USLE et les résultats ont montré une amélioration des prédictions de ce modèle empirique. (*Tran et al., 2002*).

Dans notre contexte de modélisation régionale ces conclusions sont plus nuancées. Une caractéristique de la logique floue est que pour une seule donnée d'entrée, plusieurs critères peuvent être validés simultanément et fournir des consignes différentes pour les classes de sorties. Une méthode de composition des critères pour obtenir la classe finale des sorties doit donc être choisie. Une composition simple est celle de la moyenne pondérée, elle considère comme valeur de sortie, la moyenne des valeurs de chaque critère pondérées par leurs degrés de validité. Par exemple, pour une maille avec 50% de Prairie (aléa 1) et 50% de Terre Arable (aléa 3) la valeur de sortie sera $[(1 \times 0,5) + (3 \times 0,5)] / (0,5 + 0,5) = \text{Aléa } 2$. Cette méthode simple à mettre en œuvre, présente néanmoins certaines ambiguïtés lorsque des valeurs décimales sont calculées (Aléa 2,2). Mais dans notre cas, le plus gros inconvénient de ce système est que la réponse érosive ne répond pas à un système linéaire et que les solutions moyennées ne sont généralement pas valides. Par exemple dans le cas du couvert végétal, il a une influence majeure et va nettement influencer les valeurs d'érosion quand il varie de 0 à 30%, au delà de 30 %, les variations auront une influence beaucoup plus modeste. Il en va de même pour les interactions entre paramètres. L'utilisation de la logique floue impliquerait donc de définir préalablement toutes les lois qui existent entre les variations d'expressions des paramètres et la réponse érosive, or c'est justement la méconnaissance de ces lois qui a amené à se rabattre sur un arbre de décision.

3.4.3. L'amélioration du calcul des critères individuels

Dans le modèle proposé par l'INRA, le calcul des cinq paramètres peut être amélioré sans affecter la structure de l'arbre.

Dans le cas des caractéristiques du sol, la battance et l'érodibilité sont calculées via des règles de pédo-transfert. A l'heure actuelle, rien ne permet de justifier une modification de ces règles. En revanche, des cartes de sol plus précises sont disponibles. Des calculs plus fins de la battance et de l'érodibilité basés sur une meilleure description des sols est une possibilité d'amélioration du modèle.

Pour l'occupation du sol, plusieurs résolutions sont également disponibles et grâce à la télédétection optique haute résolution, on peut obtenir des cartes d'occupation du sol plus précises que Corine land cover. Ces images représentent un coût d'acquisition mais également du temps de traitement. Des tests de sensibilités sont donc nécessaires pour tester leur apport réel.

Le MNT actuellement utilisé est de 250m mais un maillage plus fin peut être utilisé. Pour la gestion de la pente, l'acquisition d'un MNT avec une meilleure définition permettra de donner de meilleures estimations des pentes pour les reliefs peu marqués ou dans les régions vallonnées aux versants courts. Cette voie d'amélioration n'influe pas sur le reste de l'arbre de décision, elle est donc simple à mettre en œuvre.

Le modèle, dans sa configuration de base ne fonctionne que sur un croisement sous forme de superposition de cartes de paramètres. Il serait donc intéressant de tester l'influence de la prise en compte des relations « horizontales » entre les différents pixels. En effet l'érosion est typiquement le résultat de l'accumulation d'un flux le long d'un versant ou d'un chemin préférentiel des écoulements. Un pixel sera donc plus probablement sujet à l'érosion s'il est situé à l'aval d'une zone ruisselante émettrice de ruissellement qu'une zone située plus en amont. Une première relation entre la pente et l'aire drainée a déjà été définie par Le Bissonnais (Le Bissonnais et al., 2002). Des tests de sensibilité permettraient de juger de sa pertinence.

On peut même pousser plus avant le raisonnement, car deux pixels situés dans un même contexte topographique (c'est-à-dire en amont d'une zone contributive (ZC) de taille comparable) ne réagiront pas de la même façon en fonction de la nature de la ZC. On comprend bien que si la ZC est composée de surface imperméable très ruisselante ou au contraire de zones qui ont la capacité de retenir ou de diminuer le ruissellement, les pixels concernés auront un comportement différent vis-à-vis de l'érosion. Dans ce sens il serait nécessaire d'utiliser une méthode qui permette de calculer des accumulations de flux pondérés par la nature des ZC, sans pour autant nécessiter l'ajout de nouveaux paramètres pour ne pas alourdir la méthodologie.

Dans le modèle actuel, le choix a été pris d'intégrer la pluie sous deux aspects : les quintiles des hauteurs moyenne de pluie et la fréquence des pluies supérieures à 15mm/h. La recherche d'autres facteurs pourrait peut-être permettre d'améliorer la classification. Ceci pourrait s'effectuer à travers une étude de sensibilité d'un modèle de prédiction de l'érosion vis-à-vis des facteurs de climat. L'exercice consiste à effectuer des prédictions d'érosion pour de nombreuses séries climatiques et à relier les prédictions aux caractéristiques des chroniques (par exemple, nombre de jours de pluie pendant une période donnée, nombre de jours de pluie consécutifs, etc...). Si une corrélation forte est trouvée entre une des variables et l'érosion calculée par le modèle déterministe alors cette variable sera intégrée à l'arbre comme indicateur d'agressivité des pluies. La recherche de meilleures variables prédisant l'agressivité de la pluie est une voie d'amélioration de l'arbre facile à mettre en œuvre.

3.5. CONCLUSION

Dans le contexte d'une modélisation à l'échelle départementale, c'est-à-dire à une échelle avec peu de données détaillées disponibles et sans possibilité de validation directe, l'arbre de décision semble la méthode la plus adaptée et apportant le meilleur compromis entre la complexité et la qualité potentielle du résultat. Les approches alternatives (modélisation empirique ou déterministe, analyses multicritères) sont considérées comme trop complexes à

mettre en œuvre et trop gourmandes en données pour être applicables et apporter un réel gain par rapport à la méthode existante.

Par contre des voies d'améliorations sont offertes au niveau de la nature et de la résolution des paramètres d'entrée. Il est donc nécessaire de procéder à toute une série de tests de sensibilité faisant intervenir différents paramètres d'entrées dans différents contextes géographiques afin de pouvoir juger de l'apport d'une amélioration de la résolution ou de la nature des différents paramètres d'entrées.

4. Vers un cahier des charges pour un zonage de l'érosion des sols

Ce chapitre a pour objectif de synthétiser les différentes conclusions et recommandations qui ont pu être émises sur la mise en œuvre de la méthodologie de cartographie de l'aléa érosion lors des deux études de sensibilités qui ont été menées sur l'Hérault (Desprats et al., 2006) et sur l'Oise (Surdyk et al., 2006).

Dans un premier temps il peut être utile de rappeler les objectifs recherchés lors d'un zonage de l'aléa érosion à l'échelle départementale. Il s'agit d'une hiérarchisation de l'espace géographique en fonction de la probabilité d'occurrence d'un phénomène érosif qui doit :

- Permettre d'identifier les zones d'actions prioritaires à l'échelle d'un département (pour cela, la méthode doit être robuste et valide à l'échelle d'ensembles de 100 à 1000 km²)
- Mettre en œuvre une méthodologie générique sur tout le territoire qui permette de comparer les départements entre eux
- Dans une certaine mesure, permettre d'incriminer le facteur aggravant pour les zones les plus touchées.

Au vu de ces objectifs et des échelles d'investigation et de rendu qui sont souhaitées, nous avons vu que les améliorations potentielles du modèle résident plus dans le choix de données d'entrées cohérentes que dans une éventuelle modification de la structure du modèle. Nous allons donc passer en revue les différentes rubriques concernées pour synthétiser les différentes recommandations.

Les études de sensibilité ont permis de préciser le choix des facteurs d'entrée à prendre en compte ainsi que la manière de les paramétrer.

Pour la topographie, la combinaison de la pente (Illustration 15) et de l'aire contributive a été validée. Pour la prise en compte d'une aire contributive pondérée par l'occupation et la nature des sols, les résultats sont moins probants et les apports se limitent à quelques cas particuliers. Nous proposons donc de réserver ce type d'approche plutôt pour des études ciblées à des échelles plus fines, pour affiner la délimitation dans les zones à aléa fort à très fort.

Pour l'occupation du sol, les cartes CORINE Land Cover offrent un bon compromis et représentent des données faciles d'accès (mise à disposition sur demande par l'IFEN) qui permettent de distinguer entre les principaux usages des terres. Si, dans l'avenir, des données plus précises sur l'occupation des sols étaient mises à disposition (données PAC ou teruti...) cela permettrait de différencier des occupations du sol spécifiques (e.g. monoculture de maïs...) qui ont une influence particulière et

identifiée sur les processus d'érosion. Toutefois cela demanderait également d'établir des règles expertes de décision locales qui rendraient difficiles les comparaisons entre départements.

Pour le facteur sol, il est apparu assez rapidement que la carte nationale était peu adaptée et que les cartes de pédo-paysage au 1/250000 représentent un bon compromis. Les réflexions menées dans le contexte méditerranéen initiées par Y. Le Bissonnais à l'INRA et V. Antoni à L'IFEN et poursuivies dans le cadre de cette étude ont permis de compléter les règles de pédo-transferts existantes (Le Bissonnais et al., 2006) et ont abouti à une nouvelle version pour estimer les facteurs de battance et d'érodibilité sur tout le territoire métropolitain (Illustration 16 et Illustration 17).

Si les cartes de pédo-paysage au 1/250 000 sont bien adaptées pour la cartographie de l'aléa érosion à l'échelle départementale, il reste qu'actuellement leur couverture n'est pas exhaustive sur le territoire national (Illustration 21). Dans les départements où les cartes ne sont pas encore disponibles il est donc pour l'instant nécessaire de réaliser des études dédiées pour le recueil des caractéristiques pédologiques utilisées dans les règles de pédo-transfert. Sur le long terme, les études dédiées à une seule application risquent d'être plus onéreuses, car une campagne de terrain sera nécessaire pour chaque étude, contrairement à l'établissement des référentiels pédologiques qui sont multi-thématiques. Pour limiter le coût d'une étude spécifique, il est possible d'optimiser le plan d'échantillonnage des paramètres à caractériser en stratifiant le recueil des données sur la base des cartes géologiques au 1/50000. Une étude utilisant cette approche a déjà été réalisée dans le cadre du pôle de compétence Sol et Eau de Haute-Normandie par le BRGM et l'INRA avec la participation du CNRS Rouen - Caen et du bureau d'étude Aquasol (Souadi et al 2000).

La synthèse cartographique des formations géologiques de la Région de Haute-Normandie a été effectuée à partir d'un assemblage des cartes géologiques au 1/50 000, soit 35 cartes au total préalablement réduites à l'échelle du 1/100 000. Le but de cette synthèse était de mettre en évidence les contrastes de comportement à l'érosion des formations, qui ont été groupées par catégories lithologiques. En certain endroits, il a été nécessaire de s'appuyer sur la consultation des données d'archives de la banque de données sous-sol (BSS) en privilégiant les informations décrivant les horizons superficiels. Il est ressorti de cette étude que l'information géologique est pertinente pour estimer les 2 paramètres de battance et d'érodibilité avec une grande précision en Haute-Normandie car il y a une certaine uniformité des processus pédologiques.

Pour le facteur climatique nous recommandons de garder la base AURELHY couplée au nombre de jours par saison ou le seuil de 15 mm par heure pendant une heure est atteint (Le Bissonnais et al., 1998). Nous avons vu que des indices climatiques plus sophistiqués pouvaient dans certain cas être plus adaptés, mais le coût et la faible disponibilité de mesures de pluie à haute résolution limitent leur utilisation.

	Nature	Résolution
Les facteurs topographiques	MNT départementaux	90 m ou plus fin Recommandé : 50m
Le facteur d'occupation du sol	Carte CORINE land cover	Recommandé : 100m ou plus fin
Les facteurs sol	Carte de sols ou études dédiées pour cartographier les paramètres pris en compte dans les règles de pédotransfert	Le 1/1000000 est à éviter Recommandé : 1/250000 ou plus fin
Le facteur climatique	Base de données AURHELY et nombre de jours par mois ou on atteint 15 mm/h pendant une heure	Recommandé : 1000m ou plus fin

Illustration 15 : recommandation sur la nature et la résolution des données à utiliser pour un zonage de l'aléa érosion à l'échelle départemental.

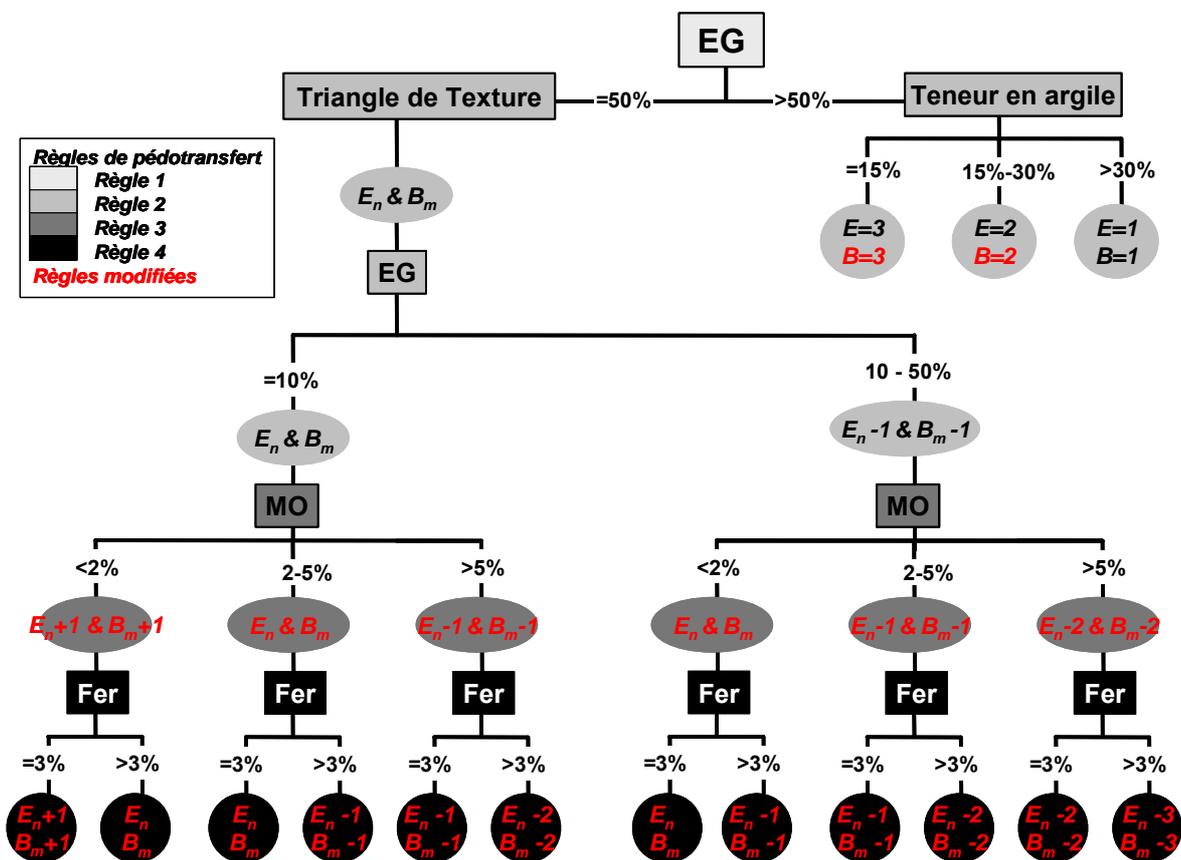


Illustration 16 : Nouvelle version des règles de pédotransfert pour estimer les facteurs de battance et d'érodibilité sur le territoire métropolitain (EG : Abondance en éléments grossiers en %, MO : abondance en matière organique en %, E : érodibilité, B : battance, 1 : très faible, 2 : faible, 3 : moyenne, 4 : forte, 5 : très forte).

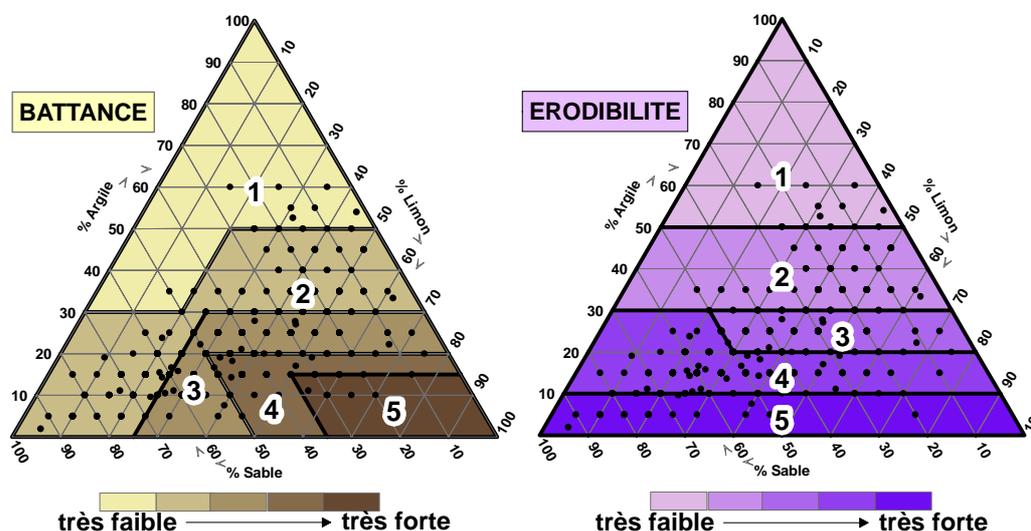


Illustration 17 : règle de pédotransfert permettant de convertir les données texturales en classes de battance et d'érodibilité par projection dans les triangles de texture redécoupés en 5 classes de sensibilité : 1 : très faible, 2 : faible, 3 : moyenne, 4 : forte, 5 : très forte (Source INRA-IFEN).

La synthèse des tests de sensibilité effectués sur les cas tests de l'Oise et de l'Hérault nous permet d'avoir une idée sur la robustesse des réponses du modèle par rapport aux changements réalisés sur les valeurs des paramètres d'entrées et dans une certaine mesure, sur l'importance relative de ces paramètres. L'illustration 18 montre les changements (en pourcentage de surface) observés sur les cartes de sensibilité à l'érosion par rapport aux changements effectués sur les cartes des paramètres intermédiaires. Le facteur qui montre le ratio le plus élevé entre les changements de la carte des paramètres et la carte de sensibilité est, pour les deux régions, l'occupation du sol. A l'inverse le facteur semblant avoir le moins d'influence est l'érodibilité. La pente montre une influence qui varie en fonction du département, ce qui s'explique facilement par les différences physiographiques entre le relief peu marqué de l'Oise et celui plus accentué de l'Hérault.

	Oise		Hérault	
	Carte intermédiaire	Carte de sensibilité	Carte intermédiaire	Carte de sensibilité
Pente	65%	35%	70%	20%
Aire drainée	28%	13%	23%	4%
Erodibilité	58%	12%	Pas de scénarios	Pas de scénarios
Battance	82%	43%	Pas de scénarios	Pas de scénarios
Occupation du sol	7%	5%	37%	27%

Illustration 18 : Changements, en pourcentage de surface, observés sur les cartes de sensibilité à l'érosion par rapport aux changements effectués sur les cartes des paramètres intermédiaires.

5. Préconisation pour la mise en place de mesures préventives

5.1. INTRODUCTION

Devant l'aggravation des dégâts observés au cours de ces vingt dernières années, de nombreuses recherches sur les processus et les facteurs de l'érosion hydrique ont été engagées, tant par l'INRA que par d'autres organismes. Elles ont contribué à mieux faire connaître les mécanismes de l'érosion des sols en se basant sur des observations de terrain, sur la modélisation des phénomènes, ainsi que sur la connaissance des mécanismes physiques. En identifiant, au moins pour partie, les causes et les facteurs aggravants du phénomène, ces travaux de recherche ont permis d'apporter des éléments de réponse sur la question de la gestion de la réponse érosive et la mise en place de mesures préventives. Plusieurs synthèses françaises ou européennes peuvent ainsi être mentionnées. Dans une première partie, nous nous appuyons sur ces études pour dégager quelles sont les voies qui actuellement semblent les adaptées à une gestion efficace et durable du paysage agricole en termes de ruissellement érosif et, dans une deuxième partie, quelles sont les données disponibles pour la mise en pratique de ces gestions.

5.1.1. Etat de l'art

Outre les synthèses scientifique qui ont décrit l'état de l'art sur les principaux mécanismes en cause sur le territoire métropolitain (Auzet, 1987 ; 1990 ; Litzler 1988 ; Le Bissonnais et al. 2002), plusieurs études commanditées par différents ministères ont également été réalisées récemment et parfois conjointement par l'Inspection Général de l'Environnement, le Conseil Général des Ponts et Chaussées et l'Inspection Générale des Finances (MEDD, 2001 ; MEDD, 2003). Il s'agissait selon les études de proposer entre autres des actions pour améliorer la connaissance du risque notamment celui lié au risque d'inondation, pour mieux prendre en compte ces risques dans les autorisations de construire et les PPR, pour identifier les mesures à mettre en œuvre pour réduire les risques en abordant la question d'un point de vue technique, économique, financier ou organisationnel. Une autre étude a également été entreprise pour faire un état des lieux du régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles et faire des propositions en vue de sa réforme éventuelle (IGE, 2005).

Des études ont également été réalisées dans d'autres régions européennes. Dautrebande (2003) a ainsi coordonné pour la région wallonne, la rédaction d'un guide méthodologique pour le choix d'aménagements appropriés en matière de conservation des sols et des eaux dans le cadre d'une convention portant sur « l'étude méthodologique pour la prévention et la correction des problèmes d'érosion et de colluvionnement des terres en zone rurale ». Plus récemment, dans le cadre du projet « Elaboration et mise en oeuvre de Dispositifs pour la Gestion des Territoires générant des Coulées boueuses » (Risque Décision Territoire, MEED), Bonafos (2005) a réalisé

une enquête européenne sur les pratiques culturales limitant le ruissellement diffus sur grandes cultures. Il ressort de son enquête que les organismes expérimentateurs sont hétérogènes et peu nombreux, peut-être en raison d'un délaissement des thèmes de recherche appliquée en Europe, au profit de problématiques plus fondamentales sur l'érosion des sols. Les tests sur des conduites en non labour occupent la moitié des expérimentations européennes : ils font intervenir des outils variés et peuvent présenter des successions diverses d'opérations culturales (avec ou sans décompactage du sol, avec ou sans travail superficiel avant le semis). Ont également été recensées des pratiques demandant l'insertion ou le remplacement d'opérations culturales dans les itinéraires techniques conventionnels ou l'adaptation du matériel conventionnel lui-même. Ces techniques agissent sur la surface soit en limitant la formation de la croûte de battance, soit en augmentant la détention superficielle. L'Allemagne, la Suisse et la France font partie des pays innovateurs pour la mise au point de pratiques culturales destinées à lutter contre les ruissellements.

Toutes ces études présentent avec plus ou moins de détails, les phénomènes d'érosion hydrique, notamment les processus en cause et les types d'érosion ainsi que les causes expliquant une aggravation de l'aléa « coulées boueuses » tels que l'évolution du paysage aux travers de la réduction du nombre de haies, de mares, de prairies, de l'agrandissement des parcelles, de la spécialisation des cultures, de l'évolution des systèmes de production et des pratiques agricoles sans oublier l'augmentation de l'urbanisation. Il y a aussi beaucoup d'informations concernant les moyens d'actions et les méthodes de lutte contre l'érosion des sols.

Ces études montrent qu'il y a une volonté réelle de conservation des eaux et des sols qui s'est développée depuis qu'on a pris conscience de l'existence de ces phénomènes érosifs. Initialement, les actions de lutte contre les inondations catastrophiques étaient plutôt tournées vers la réalisation d'aménagements hydrauliques de protection plutôt situés en aval, tels que des bassins de retenue et de décantation afin de protéger les zones urbanisées. Si ces bassins de retenue restent indispensables, ils présentent néanmoins des inconvénients (Le Bissonnais et al., 2002) notamment liés à leurs coûts d'entretien, principalement leur curage. Ils ne font pas non plus clairement prendre conscience de leurs responsabilités aux acteurs du paysage en amont. Ils peuvent même, en aval, participer au développement d'un sentiment de sécurité excessif chez les habitants qui favorise la poursuite de l'urbanisation, alors que, du fait de leur dimensionnement, ils ne sont efficaces que pour des crues d'une période de retour donnée. La recherche d'une plus grande efficacité a conduit alors à prendre le problème à son origine en associant à ce volet curatif un volet préventif visant à développer la mise en œuvre de mesures portant sur le ruissellement et l'érosion plus en amont des zones urbanisées afin de réduire le ruissellement boueux en provenance du territoire agricole.

Actuellement, les différents organismes en charge de ces problèmes cherchent avec l'aide des acteurs concernés à développer des actions de longue durée et globales à l'échelle des versants ou des bassins versants en fonction du type d'érosion auquel ils sont confrontés. Ces actions recouvrent deux volets qui visent à lutter de façon complémentaire à la fois contre la genèse et la propagation du phénomène :

- un volet agronomique qui a pour objectif de réduire l'érosion des terres et le ruissellement au niveau des versants, en agissant sur la rugosité et la capacité d'infiltration de la surface du sol,
- un volet hydraulique douce pour créer des aménagements afin de gérer les écoulements concentrés et donc limiter l'érosion et les inondations dans les vallées.

En ce qui concerne les régions de grande culture, plusieurs documents déjà cités (Le Bissonnais et al., 2002, Dautrebande, 2003 ; Bonafos, 2005) présentent des éléments d'information en vue de contribuer à l'orientation des choix d'aménagements appropriés. D'autres informations sont également diffusées sur internet. On peut citer entre autres les fiches « ruissellement et érosion » rédigées par les chambres d'Agriculture de la Seine Maritime et de l'Eure et l'AREAS (Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols) avec le soutien de la Région Haute-Normandie. Ces fiches disponibles sur le site web de la chambre d'Agriculture de l'Eure (<http://www.agri-eure.com>) abordent différents aspects :

- Lutte contre l'érosion des sols : Protection des versants
- Fiche ruissellement érosion : "Semis de Printemps : Betteraves et Maïs"
- Fiche ruissellement érosion : "Semis d'Automne : Céréales et Colza"
- Fiche ruissellement érosion : "Lin"
- Fiche ruissellement érosion : "Pois"
- Stocker les eaux de ruissellement : prairies inondables
- Lutter contre l'érosion : Bande de Terre Retassée, chemin d'Eau Enherbé
- Stocker les eaux de ruissellements : mares tampons
- Des pratiques culturales pour limiter le ruissellement : Gestion de la parcelle entre deux cultures
- Collecter les eaux de ruissellement : fossés talus

Pour les régions de vignoble, la présence d'une couverture végétale constitue actuellement l'un des meilleurs moyens de lutte contre l'érosion pour conserver les sols viticoles. Il est cependant nécessaire de pratiquer cette technique avec raisonnement en fonction des conditions pédoclimatiques du vignoble en général et de la parcelle en particulier. En effet selon la pluviométrie, la réserve utile, l'ensoleillement et la température des concurrences hydrique et azotée peuvent avoir plus ou moins de conséquences sur la qualité des raisins voire sur la survie de la vigne. Dans les vignobles non seulement sensibles à l'érosion mais aussi à la sécheresse, ceci impose la mise en œuvre de solutions d'enherbement partiel et/ou temporaire. Cette technique n'est malheureusement pas applicable dans tous les vignobles en raison des densités de plantation ou des modes de conduite de la vigne qui ne permettent pas toujours un enherbement facile des vignes ni l'entretien du couvert végétal lorsque l'écartement des pieds est réduit.

Cependant quelque soit la technique ou l'aménagement envisagés, il faut prendre en compte que l'eau qui circule sur un versant ignore les limites de parcelles et d'exploitation, ce qui impose souvent une coopération entre agriculteurs sur des espaces voisins reliés entre eux par des fonctionnements hydrauliques. Cependant selon le type d'action, le territoire sur lequel doivent s'envisager des coopérations n'est

pas le même. Le versant (ou le bassin versant) constitue une délimitation spatiale pertinente pour concevoir des coordinations entre voisins sur des affectations de cultures aux parcelles et des techniques. Il peut l'être aussi pour des aménagements du parcellaire de faible ampleur. Mais au-delà, c'est au niveau de la commune que, par un remembrement hydraulique, on peut modifier plus en profondeur le parcellaire.

Or, le contexte économique conduit les agriculteurs à avoir des logiques productives et individuelles. Productives, elles conduisent à ne prendre en considération les dégâts que dans la mesure où ils affectent la production. Par exemple, **il est difficile de faire adopter des pratiques qui limitent le ruissellement dans les cas fréquents, où ce dernier n'engendre pas d'érosion sur l'exploitation même**. Individuelles, elles se traduisent par une gestion de l'espace, limitée au territoire de l'exploitation, et donc sans tenir compte de la continuité des phénomènes physiques en jeu.

5.1.2. Gestion collective du ruissellement érosif au sein des versants ou des bassins versants

Il importe donc d'estimer, en fonctions des situations, **les possibilités de gestion collective du ruissellement érosif** au sein des versants ou des bassins versants non seulement dans leur dimension technique mais aussi sociale et économique. Ce qui est vrai pour les exploitations agricoles l'est aussi pour les collectivités locales qui elles-aussi sont liées par une relation amont/aval dès lors qu'elles cherchent à lutter contre les inondations boueuses.

Marge de manœuvre

Dans le cadre de sa thèse, Joannon (2004) a étudié les possibilités de modifications des systèmes de culture afin de réduire le ruissellement, ceci en tenant compte de la diversité des exploitations agricoles à l'échelle d'un petit bassin versant agricole. Ces modifications doivent être compatibles avec les facteurs de production de l'exploitation et organisées spatialement au sein d'un bassin versant. Pour cela, à partir du cas d'étude du bassin versant de Bourville (Pays de Caux), il a d'abord analysé les déterminants des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole, afin d'en déduire les marges de manœuvre des agriculteurs pour modifier les règles de localisation des cultures et/ou les itinéraires techniques de gestion de l'interculture.

En ce qui concerne la localisation des cultures, il a montré qu'une fois l'assolement déterminé (choix des cultures et surface de chacune d'elles), la localisation spatiale des cultures sur le territoire de l'exploitation est fonction de :

- contraintes du milieu et d'organisation du travail qui vont déterminer la zone cultivable pour chacune des cultures présentes sur l'exploitation,
- contraintes liées aux règles de succession culturale qui vont déterminer, en fonction des cultures précédentes, les cultures possibles une année donnée sur chaque parcelle de la zone cultivable,

- règles de regroupement de culture sur des parcelles voisines afin de simplifier l'organisation du travail.

La validation des règles formalisées à partir des enquêtes en exploitations agricoles a été réalisée, d'une part en analysant l'historique des cultures implantées sur chaque parcelle, et d'autre part en simulant la localisation des cultures pour la campagne 2000-2001 dans les 14 exploitations principales du bassin versant et en comparant cette simulation aux cultures réellement implantées par les agriculteurs.

En ce qui concerne la modification des itinéraires techniques en interculture (ajout d'opérations culturales ou décalage de dates de réalisation de certaines opérations), il est nécessaire pour pouvoir identifier les possibilités des agriculteurs de prendre en compte les contraintes d'organisation du travail au sein de l'exploitation (disponibilité de la main d'œuvre et du matériel). Les règles concernant l'organisation du travail ont été formalisées par Joannon (2004) à partir d'enquêtes réalisées dans les 14 exploitations agricoles. Pour chacune d'elle, les informations suivantes ont été recueillies : calendrier des opérations culturales et détail des itinéraires techniques, matériel et main d'œuvre disponibles, vitesse de réalisation des différents chantiers et gestion des concurrences entre chantiers. D'autre part, des données climatiques ont été mobilisées afin de calculer les jours disponibles pour chaque chantier (ce sont les jours pour lesquels la réalisation d'un chantier est possible, compte tenu des conditions climatiques).

Ayant modélisé d'un point de vue technique la manière dont les agriculteurs mobilisent les ressources productives de leur exploitation, Joannon a ensuite étudié les possibilités des agriculteurs pour les mobiliser différemment, ceci dans le but de réduire le ruissellement sans pour autant affecter la fonction de production. En fonction des exploitations agricoles, il a identifié plusieurs niveaux de marge de manœuvre. Par rapport à la localisation des cultures, elles dépendent de la planification à l'avance ou non les successions culturales, de la diversité des cultures, de la dispersion du parcellaire et du délai de retour du blé. Pour la réalisation d'opérations culturales limitant le ruissellement durant l'interculture telles que le déchaumage à socs ou bien le semis d'une culture intermédiaire de moutarde, l'analyse a permis de mettre en évidence trois niveaux de marge de manœuvre (aucune marge, des marges de manœuvre intermédiaire uniquement après les récoltes précoces de pois et blé et des marges de manœuvre importantes derrière les récoltes précoces mais aussi tardives). Il faut noter que ces marges de manœuvre seront différentes en fonction des conditions climatiques de l'année. Plus l'année sera pluvieuse, moins il y aura de marge de manœuvre pour modifier l'itinéraire technique en interculture.

L'ensemble des résultats a été cartographié (Illustration 19) ce qui permet de constater que les marges de manœuvre se répartissent de manière inégale :

- l'amont du bassin versant se caractérise par des marges de manœuvre relativement importantes pour modifier la localisation des cultures, mais les marges de manœuvre pour modifier les itinéraires techniques d'interculture sont plus réduites ;
- à l'aval, la modification de la localisation des cultures semble plus difficile, mais celle des itinéraires techniques plus facile.

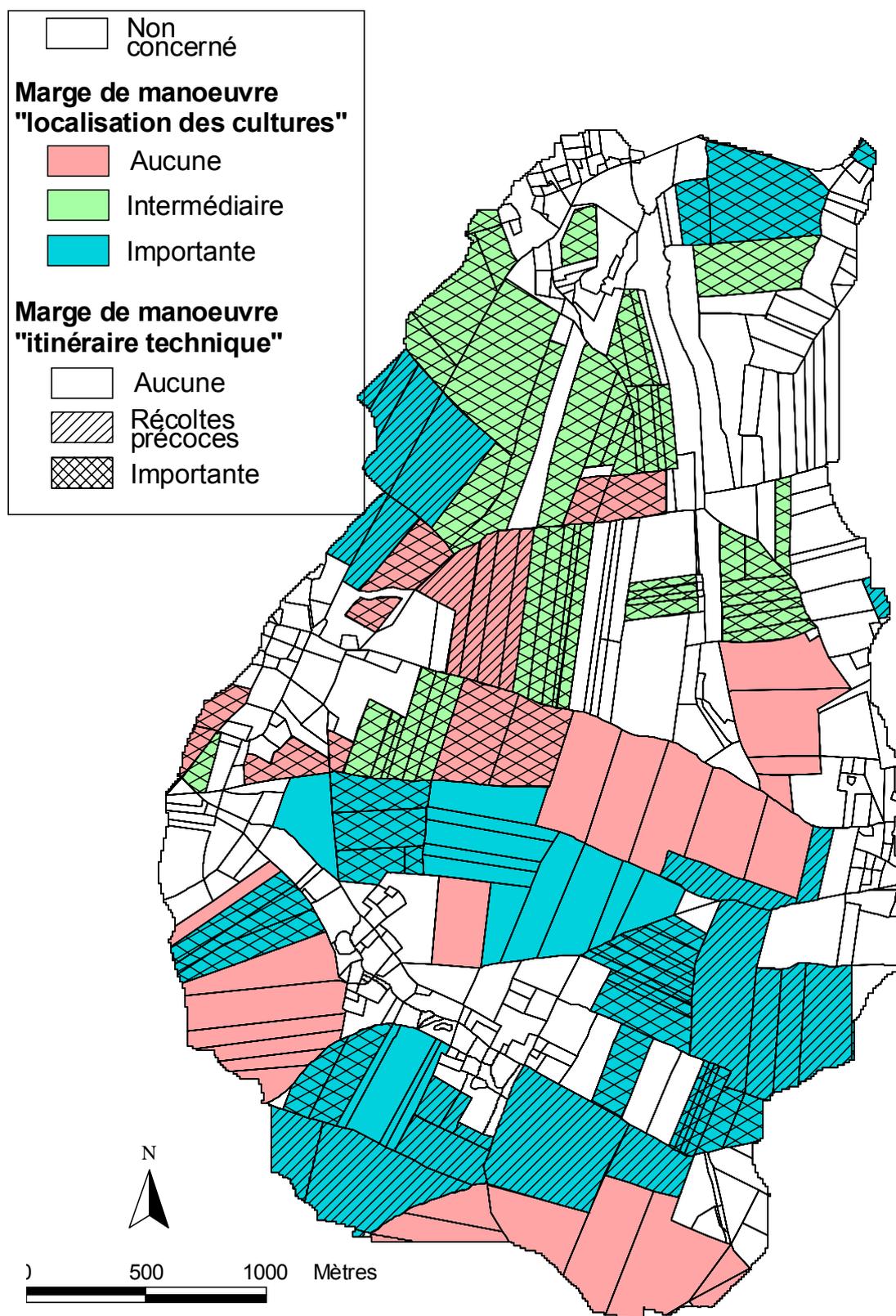


Illustration 19 : Spatialisation des marges de manoeuvre sur le bassin versant de Bourville (76)

Ce type d'information est particulièrement important pour les animateurs de syndicat de bassin versant. En effet, manquant de temps disponible, ils doivent cibler leurs actions : ils pourront le faire dans un premier temps en direction des agriculteurs ayant a priori plus de marge de manœuvre. La méthode développée permet donc, pour un bassin versant donné, de déterminer les types de modification des systèmes de culture efficaces pour réduire le ruissellement, et les zones nécessitant une coordination entre agriculteurs.

Démarches participatives

Si les études récentes montrent qu'il existe des solutions techniques à plusieurs niveaux allant de l'amont vers l'aval pour réduire le risque de ruissellement érosif, ces mêmes études montrent également **qu'une combinaison cohérente de ces différentes actions à l'échelle du bassin versant est une des clés pour lutter efficacement contre les effets dommageables du ruissellement** (Dautrebande, 2003). Cependant, dans les faits et dans le discours de certains élus locaux, les actions engagées rendent souvent compte d'une difficile mise en place d'actions globales et systémiques. L'organisation de l'aménagement contre les inondations se présente davantage comme une juxtaposition d'actions localisées et met souvent en avant une déconnexion entre les différentes problématiques (incluant espaces de décisions et acteurs). De nombreux sites offrent la démonstration d'une absence d'actions spatialement organisées, témoins de l'inefficacité d'une solidarité de bassin-versant (Delahaye et al., 2004).

L'efficacité des actions de lutte contre ruissellement et érosion doit dès lors établir le lien entre les différents espaces de gestion, et surtout le lien entre des acteurs aux intérêts différents et ce d'autant plus qu'il y a le plus souvent une **disjonction entre les zones de production du ruissellement et les zones où apparaissent les dégâts** que ce soit au sein du bassin versant ou à son exutoire. Imaginer un aménagement collectif de l'espace est donc un véritable défi d'autant plus que ce management environnemental, commandé, en quelque sorte, par les processus naturels à maîtriser, ne laisse pas aux acteurs la liberté du choix avec qui coopérer.

Il est donc important de développer des projets d'aménagement qui intègrent les multiples dimensions des problèmes à traiter en prenant mieux en compte la complexité des situations rencontrées, la multiplicité des causes de ces problèmes ainsi que la diversité des solutions envisagées. Ces projets doivent adopter si possible des formes participatives et décentralisées de manière à être plus à l'écoute des attentes des population, à mieux appréhender les problèmes vécus et à assurer une appropriation par les groupes humains concernés des actions d'amélioration de leur situation. Il est nécessaire d'unifier les représentations que les différents porteurs de connaissances ont de la problématique. **Dans ce contexte, la concertation, comme approche de gestion, prend donc tout son sens en incitant à la réalisation d'instances collectives de discussion.** Dans ces groupes, les acteurs n'ayant pas forcément des intérêts similaires mais étant reconnus interdépendants peuvent partager leurs représentations de la réalité afin de se mettre d'accord autour d'une problématique commune et de définir un plan d'action concerté vers une gestion durable de la ressource.

Différentes approches participatives existent. On peut citer par exemple la démarche de modélisation d'accompagnement développée par un groupe de chercheurs intéressés par la gestion des ressources naturelles et de l'environnement (Collectif ComMod, 2006). Pour les chercheurs ComMod², il s'agit d'intégrer les dynamiques sociales et écologiques ainsi que les interactions existantes entre les acteurs ayant des perceptions, objectifs, poids et niveaux d'informations différents dans un processus de négociation en se focalisant spécialement sur le processus de prise de décision résultant de ces interactions (Illustration 20).

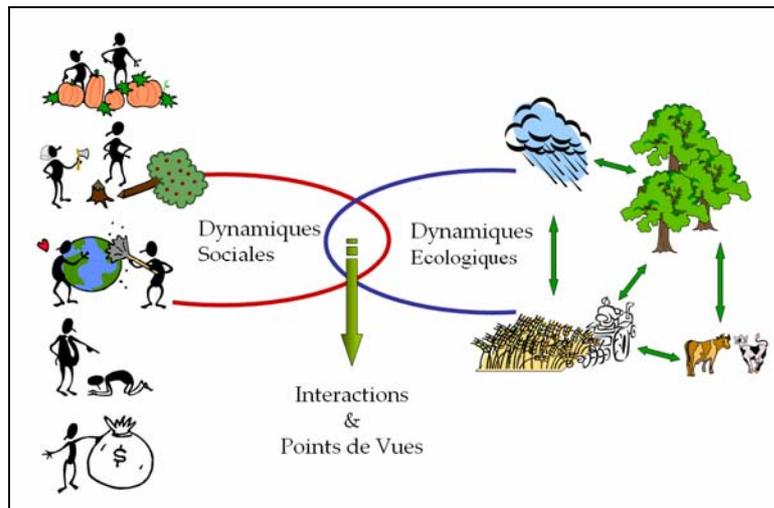


Illustration 20 : Représentation d'un système complexe de gestion de ressources naturelles

Cette démarche est en cours d'évaluation dans le cadre d'un projet financé par le programme Agriculture et Développement Durable (ANR). Il s'agit de mesurer, a priori et a posteriori, les effets de la mise en œuvre de la démarche ComMod sur différents terrains et enjeux de développement durable, pour mieux caractériser et délimiter les conditions adaptées à son emploi en explorant tout particulièrement les modalités de réalisations concrètes des différentes phases de la démarche d'aide à la décision collective ainsi que les implications et les conséquences de sa mise en œuvre de cette démarche. Dans ce cadre, une étude portant spécifiquement sur l'application de cette démarche à la gestion des phénomènes érosifs au sein des bassins versant a été initiée en 2006 (Echeverria, 2006).

² Abréviation venue de la traduction du concept de modélisation d'accompagnement en anglais.

5.2. DE QUELLES DONNEES A-T-ON BESOIN POUR METTRE EN ŒUVRE DES PRATIQUES OU DES DISPOSITIFS ANTIEROSIFS ?

Quelques soient les phénomènes de ruissellement érosifs auxquels les acteurs sont confrontés, un certain nombre de facteurs faisant maintenant l'objet d'un consensus doivent être pris en compte pour étudier ces phénomènes érosifs et choisir les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour limiter la production de ruissellement érosif au travers d'une modifications des pratiques ou l'implantation de dispositifs antiérosifs. Pour prendre en compte ces facteurs, il faut acquérir des données sur le milieu physique ainsi que des données sur l'occupation du sol.

5.2.1. Données sur le milieu physique

Les sols

Principal support de la production végétale, les sols interviennent également pour une grande part dans tous les problèmes environnementaux liés à l'activité agricole. Le sol est généralement constitué d'agrégats dont la disposition dans l'espace varie selon ses conditions de formation et les divers remaniements qu'il subit. Les espaces existants entre ces divers agrégats constituent la porosité du sol. C'est dans ce réseau d'espace libre que circulent les eaux infiltrées. Une parcelle tassée favorise un déclenchement rapide du ruissellement qui sera, au contraire, retardé si la parcelle a été labourée récemment. Les propriétés du sol et notamment son aptitude à infiltrer les eaux de pluie varient en fonction des types de sols (structure, composition physico-chimique, etc.). Ainsi, sur les sols limoneux, l'impact des gouttes d'eaux contribue à désagréger la structure du sol. Les agrégats se réorganisent alors en feuillets ne laissant aucun vide entre eux ce qui réduit considérablement sa porosité. C'est ce qu'on appelle une croûte de battance qui a comme conséquence une infiltration très réduite des eaux de pluie qui ruissellent alors dans leur quasi totalité. Dans d'autres contextes, les dégâts vont être d'autant plus importants que les sols considérés sont minces et particulièrement pauvres en matière organique. Il est donc important de connaître les sols pour estimer non seulement les problèmes d'érosion potentiels mais aussi les pratiques adaptées pour les éviter ou les limiter.

Les informations sur les sols sont fournies traditionnellement par des cartes pédologiques résultant généralement d'une synthèse par un expert des travaux de cartographie réalisés sur le terrain. L'expert s'appuie souvent en premier lieu sur la connaissance des facteurs de la formation des sols qui lui permettent de stratifier son échantillonnage. Sur le terrain, des relevés ponctuels avec des prélèvements d'échantillons pour analyses, lui permettent ensuite de préciser la nature et l'extension des types de sol (Le Bas et al., 2005).

Actuellement en France, les Référentiels Régionaux Pédologiques au 1/250 000 constituent l'information minimum requise à l'échelle des régions et de la nation. Il est en effet indispensable de parvenir à cette couverture exhaustive du territoire français dans un délai raisonnable (10 ans). Ce programme s'adresse en priorité aux décideurs et aux aménageurs régionaux.

L'objectif de la constitution des Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) est de disposer de bases de données géographiques sur la nature et la distribution des sols, compatibles avec une utilisation régionale, dans un contexte national et européen. Ces bases de données doivent posséder un degré de précision géographique permettant une restitution cartographique à l'échelle du 1 : 250 000. Les Unités cartographiques délimitées dans le cadre de ce programme sont appelées des « Pédopaysages », (ou « paysages pédologiques », ou encore « Unités Pédo-Paysagères »). Une telle Unité peut se définir comme « l'ensemble des horizons pédologiques et des éléments paysagiques (végétation, effets des activités humaines, géomorphologie, hydrologie, roches mères ou substrats), dont l'organisation spatiale permet de définir, dans son ensemble, tout ou partie d'une couverture pédologique ». En conséquence, à cette échelle, les Unités cartographiques de sol sont généralement des regroupements de plusieurs unités typologiques de sol, effectués sur la base de leur organisation dans le paysage.

La mise en place des RRP s'effectue généralement sur la base d'un partenariat régional ou départemental. Une convention est établie entre les différents maîtres d'ouvrage, qui désignent en leur sein un maître d'ouvrage délégué. La réalisation des travaux proprement dits peut faire appel à des chargés d'étude indépendants. L'origine des fonds mobilisés pour la réalisation du programme peut être très diverse (fonds européens, nationaux, régionaux, départementaux, autofinancements des maîtres d'ouvrage). Dans le cadre du GIS Sol, le ministère en charge de l'agriculture peut apporter des crédits incitatifs, l'INRA met à disposition son savoir faire méthodologique, l'ensemble des documents et bases de données en sa possession sur le terrain d'étude, la structure de la base de données, une aide pour le choix des chargés d'étude, et des procédures de vérification de la qualité des données acquises. En retour, les bases de données sont retransmises à l'INRA à titre conservatoire, et pour la constitution d'une base de données nationale harmonisée à cette échelle.

L'objectif est d'arriver à une couverture exhaustive du territoire à l'horizon 2012 ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui (Illustration 21). Actuellement, près de 200 applications ont été répertoriées. Leur analyse a permis de les classer selon plusieurs typologies prenant en compte les demandeurs, les finalités de la demande (aide à la décision régionale ou locale, mise au point d'outils, etc.), les objectifs thématiques (protection de la ressource en eau, travaux d'aménagements, aptitudes agricoles, etc.), la résolution des données sols utilisées et le degré de complexité de l'application.

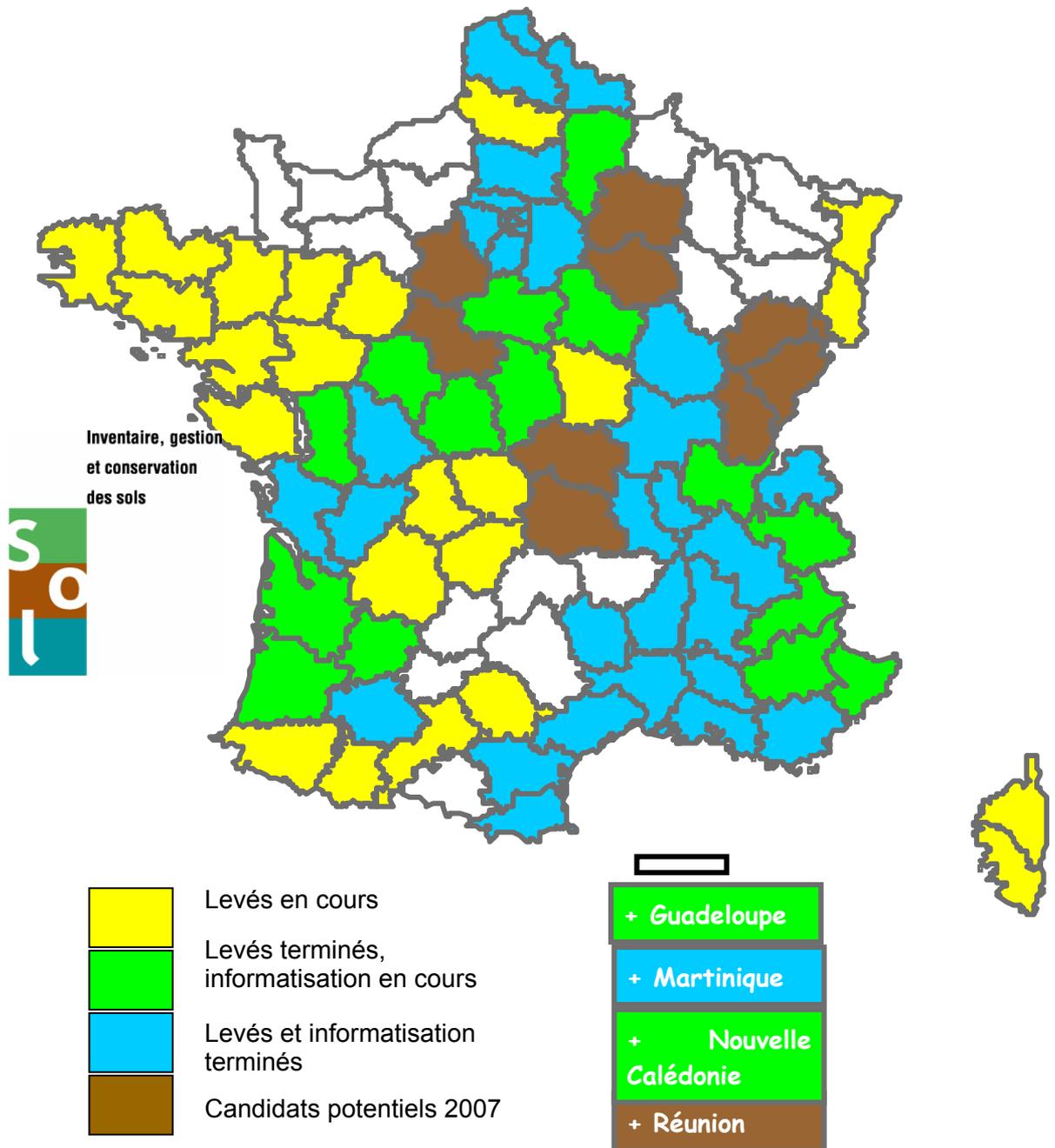


Illustration 21 : Etat d'avancement des Référentiels Régionaux Pédologiques (GIS Sol, 2006)

La pluviométrie

Pour caractériser l'influence du climat, il est nécessaire de disposer d'informations sur les quantités d'eau précipitées qui sont mesurées à partir de pluviomètres et de pluviographes constitués en réseaux. La mesure est toujours ponctuelle et la densité des appareils sur le terrain permet rarement d'apprécier l'étendue spatiale des phénomènes (Illustration 23) et ce d'autant plus que tous les postes ne sont pas équipés pour mesurer tous les types de données possibles (Illustration 22). La faible densité des instruments de mesure et le nombre limité d'années de mesures continues entraînent de larges incertitudes sur les caractéristiques des phénomènes pluvieux en un point quelconque du territoire. Les études statistiques tendent en conséquence à surestimer les périodes de retour de tous les phénomènes importants (IGE, 2005).

Pour calibrer des ouvrages hydrauliques ou estimer la cinétique de dégradation des états de surface sous l'action des pluies, le paramètre le plus pertinent serait probablement l'énergie cinétique cumulée des pluies. Cependant, ce paramètre n'est pas disponible et il faut donc se contenter le plus souvent des hauteurs de pluie cumulée, pondérées par une information sur l'intensité des précipitations (Le Bissonnais et al., 2002). L'idéal serait néanmoins de pouvoir disposer d'informations plus systématiques sur les pluies horaires avec non seulement les hauteurs d'eau mais aussi les intensités à 6 minutes, or à peine 1/3 des stations permettent de récupérer ce des données horaires. Par ailleurs, on manque aussi d'informations pour caractériser les périodes de retour des événements pluvieux.

Type de station (Nb)	Définition / Disponibilité des données pluviométriques
0 (113)	station professionnelle avec observation humaine, sur place, de temps sensible <ul style="list-style-type: none"> • Données <u>horaires</u> disponibles à partir de H+1. • Données <u>quotidiennes</u> disponibles à partir du lendemain à 8 h.
1 (38)	station avec observation humaine, non professionnelle ou à distance, de temps sensible <ul style="list-style-type: none"> • Données <u>horaires</u> disponibles à partir de H+1. • Données <u>quotidiennes</u> disponibles à partir du lendemain à 8 h.
2 (1084)	station automatique temps réel = transmission quotidienne des données <ul style="list-style-type: none"> • Données <u>horaires & quotidiennes</u> disponibles à partir du lendemain à 8 h.
3 (87)	station automatique temps différé = transmission et exploitation différées <ul style="list-style-type: none"> • Données <u>horaires & quotidiennes</u> disponibles au plus tôt 45 jours après la fin du mois en cours.
4 (2824)	station manuelle <ul style="list-style-type: none"> • aucune donnée horaire n'est disponible

	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Données quotidiennes disponibles au plus tôt 45 jours après la fin du mois en cours.</i>
5 (6)	station automatique ou poste à interrogation occasionnelle <ul style="list-style-type: none"> • <i>La disponibilité des données est variable.</i>

Illustration 22: Données pluviométriques disponibles en France en fonction du type de station

Météo-France est l'organisme en charge du réseau national de stations météorologiques (<http://climatheque.meteo.fr/>). Outre les mesures directement issues de ce réseau telles que les précipitations, les températures, l'humidité, le vent, le rayonnement, l'insolation, la nébulosité et les pressions, d'autres données issues de calcul sont également disponibles comme par exemple des calculs d'évapotranspiration potentielle, de bilan hydrique, de sommes de températures, mais aussi des normales climatiques réalisées sur 30 ans, des cartographies de paramètres, des données interpolées spatialement, etc. Météo-France a ainsi développé une méthode appelée AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie) qui a pour but de répondre de façon automatique et opérationnelle à des besoins en cartographie de paramètres pluviométriques statistiques (Benichou et Le Breton 1987). Pour chaque point de mesure cette méthode définit la notion de « paysage » environnant, la méthode de codage et la reconnaissance automatique du « paysage » sur un domaine géographique déterminé. La technique d'analyse permet la cartographie d'un champ le plus réaliste possible, prenant en compte en chaque point de mesure la valeur observée et le « paysage » associé. La méthode AURELHY peut s'appliquer à des champs pluviométriques statistiques sur n'importe quelle région de France avec une précision (maille) de 5 km. En plus de la carte analysée, l'équation de régression avec le relief permet des interprétations intéressantes dans le temps (évolution annuelle) et dans l'espace (comparaisons entre zones).

Météo-France dispose aussi de radars météorologiques. Baptisé ARAMIS, le réseau comprend 20 radars répartis sur le territoire métropolitain. L'ensemble des données recueillies et traitées par Aramis est disponible 24 heures sur 24 et renouvelé toutes les quinze minutes sur l'ensemble du territoire sous la forme d'une mosaïque des images de chacun de ces radars. Utilisés à l'origine pour détecter les avions, les radars sont devenus au début des années 60 un moyen d'observation irremplaçable pour détecter et quantifier les précipitations. En effet, ils permettent de localiser les précipitations (pluie, neige, grêle) et de mesurer leur intensité en temps réel. Répartis sur l'ensemble du territoire, ils ont une portée d'environ 100 km pour la mesure et de 150 à 200 km pour la détection des phénomènes dangereux. Cette cartographie des précipitations et de leur intensité apporte aux prévisionnistes un outil précieux pour l'élaboration des prévisions à courte échéance et des informations indispensables aux Services de prévision des crues en temps réels puisqu'il fournit après traitement approprié, une estimation des cumuls de précipitations.

Il existe aussi d'autres réseaux de stations météorologiques à vocation nationale, régionale ou locale et souvent orientés pour une utilisation particulière. On peut citer par exemple, le réseau de l'INRA qui comprend 80 stations automatiques réparties sur

le territoire français, ainsi que les stations météorologiques des chambres d'agriculture ou des services de la protection des végétaux (Le Bas et al., 2005).

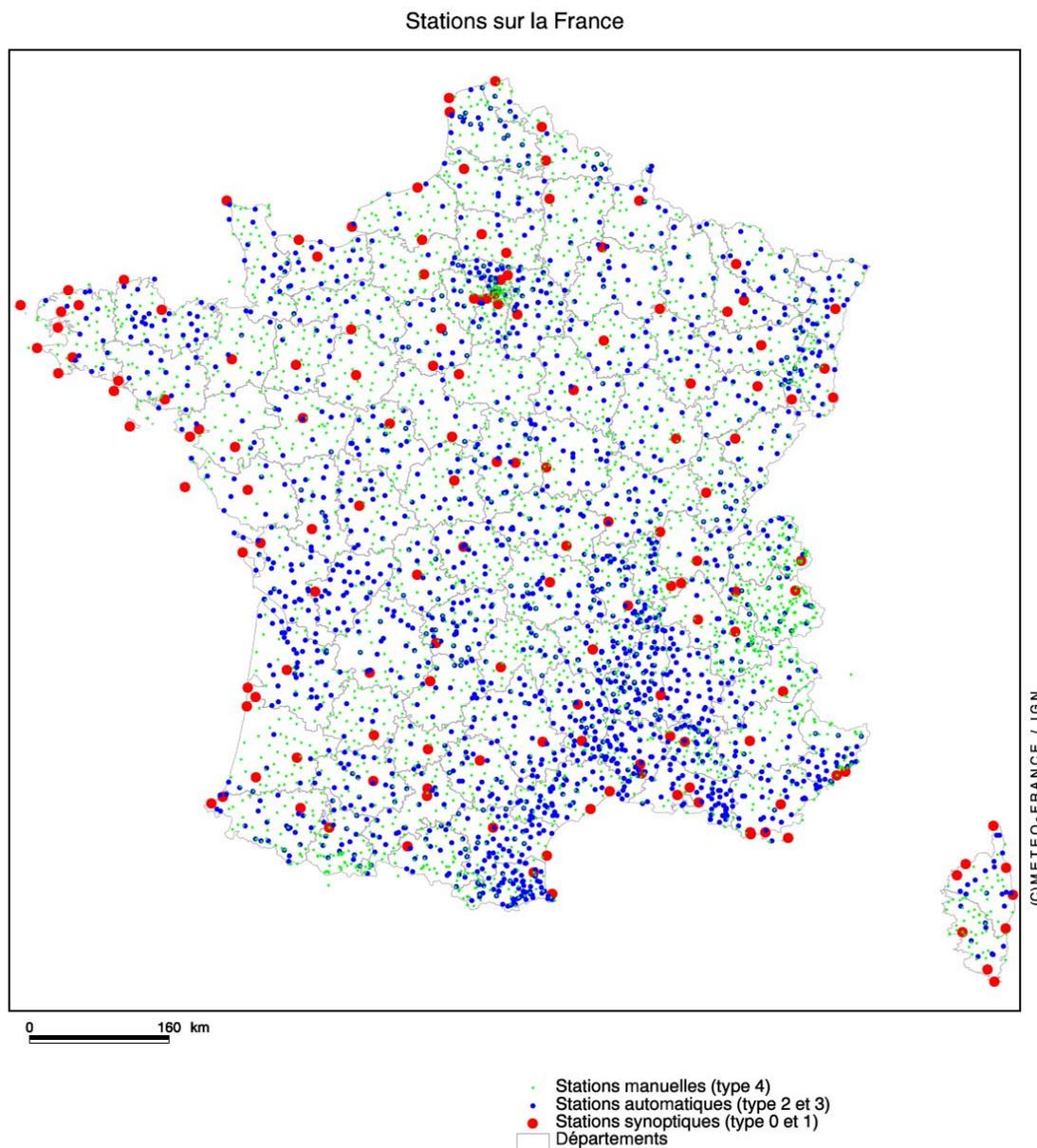


Illustration 23: Station météorologique sur la France

Le relief

L'influence du relief est très importante à prendre en compte car il agit sur les flux d'eau aux travers de composantes telles que l'intensité ou l'orientation des pentes, le dénivelée, l'altitude moyenne, etc. Les versants ou les bassins versants auront des

temps de réponse d'autant plus courts, et donc des débits d'autant plus importants, que la pente moyenne de leur réseau d'écoulement sera plus accentuée. En effet, sur terrain plat ou à faible pente, les eaux ont tendance à stagner et à s'infiltrer sous l'influence de la gravité. En revanche sur terrains pentus, cette même gravité incite les gouttes d'eaux à dévaler la pente vers les points bas. Les fortes pentes engendrent donc des vitesses d'écoulement plus élevées. Les effets destructeurs de l'eau résultent souvent de son énergie cinétique (entraînements d'objets et de personnes, effondrements de constructions au point d'impact par choc, etc.).

Généralement on distingue deux types de produit qui sont mobilisés pour obtenir des informations topographique sur de vaste territoire : les modèles numériques d'élévation et les modèles numériques d'altitude ou de terrain.

Le modèle numérique d'élévation SPOT produit par la société Spot Image a une précision au sol équivalente à la seconde d'arc (environ 30 mètres), sa précision altimétrique absolue étant d'environ 5 mètres. Généré à partir des acquisitions faites par l'instrument HRS embarqué à bord du satellite SPOT5, il constitue une avancée technologique majeure car les deux images permettant une stéréoscopie sont acquises simultanément par visées avant / arrière. On évite ainsi les variations temporelles dues à l'évolution de l'occupation du sol ou du couvert nuageux, lorsque les MNE ancienne génération étaient réalisés à partir de données acquises à plusieurs jours d'intervalle. Il s'agit donc bien d'un Modèle Numérique d'Elévation, qui indique pour un pixel donné l'altitude au sommet de la canopée, ou des bâtiments en milieu urbain.

Les Modèles Numériques d'Altitudes ou de Terrain donnent pour un pixel donné l'altitude au sol car ils sont obtenus à partir de l'interpolation de courbes de niveau et de points cotés disponible par exemple sur les cartes topographiques. A partir de ces produits, on peut dériver de nombreuses informations telles que les pentes, leur orientation et calculer à partir de fonctions incluses dans des SIG raster des directions d'écoulement influencées par la topographie et des accumulations de flux.

En France, ce type de données est disponible auprès de l'institut Géographique National (IGN) qui a développé plusieurs bases de données (www.ign.fr) telles que la BD ALTI® qui décrivent la forme du terrain à différentes échelles (du 1 : 50 000 au 1 : 1 000 000). Mais on peut aussi trouver des MNT gratuitement sur le Web. Ainsi en février 2000, la NASA a effectué une mission de cartographie de la topographie du globe entre 60° N et 60° S, soit presque toute l'étendue de la surface terrestre, par radar grâce à la navette Endeavour (Projet SRTM : Shuttle Radar Topographic Mission). Il en résulte aujourd'hui une banque de donnée topographique à haute résolution (3 arc-secondes de résolution horizontale, soit environ 90 m) mise en ligne gratuitement et téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

Des MNT nettement plus précis sont également disponibles grâce à la mise en orbite du satellite SPOT 5 depuis le 4 mai 2002. Il diffère des précédents satellites SPOT par une meilleure résolution de prise de vue des capteurs haute résolution visible et proche infra rouge puisque les deux instruments jumeaux acquièrent des images multispectrales avec une résolution de 10 m. Grâce à l'évolution des capacités du capteur appelé maintenant Haute Résolution Géométrique (HRG), la résolution de la

bande spectrale Panchromatique (totalité du visible) passe de 10 à 5m. Seul le canal Moyen infra-rouge garde une résolution de 20 m. Les instruments de prise de vue possèdent une particularité qui permet d'obtenir une image à très haute résolution. A partir des canaux panchromatiques à 5m, équipés d'une double ligne de détecteurs de 12000 photodiodes juxtaposées et décalées, on acquiert deux images à 5m simultanément. Les données recueillies reçoivent ensuite au sol un traitement complexe (entrelacement, interpolation, fusion) qui aboutit à restituer une image de 2,5 m de résolution. Cette nouvelle capacité ouvre des perspectives notamment dans le domaine urbain ou celui de l'agriculture de précision, reconnaissance. SPOT 5 est aussi doté d'un système stéréoscopique appelé HRS permettant une prise de vue 20° avant et 20° arrière quasi-simultanée de 600km le long de la trace du satellite sur 120 km de large. Cette stéréoscopie permet de construire des modèles numériques de terrain.

Pour une étude plus locale, il est possible d'effectuer des levés topographiques en utilisant par exemple un théodolite ou un GPS.

Le théodolite est un appareil mesurant des angles dans les deux plans horizontal et vertical afin de déterminer une direction. Il est utilisé pour réaliser les mesures d'une triangulation : mesure des angles d'un triangle. Le théodolite est en gros un rapporteur perfectionné, qui permet de relever l'angle entre deux points. En fait, ce qu'on mesure n'est pas directement l'angle entre deux repères visibles (signaux sur une montagne, clocher,...), mais entre la verticale de ces signaux, c'est à dire qu'on fait abstraction de la hauteur à laquelle les repères sont visibles, pour n'en retenir que le gisement (les verticaux des signaux visibles). On cale donc le théodolite à l'horizontale, et les angles ne sont mesurés que dans le plan horizontal, avec une petite lunette de visée qui peut pivoter verticalement, pour viser en hauteur. Les conditions de bonne visibilité et le relief permettent en France de travailler sur des visées de 40 à 50 km en plaine, un peu plus sur des points élevés isolés. Les angles sont lus, avec les meilleurs théodolites, avec une précision de l'ordre du décimilligrade (on fait les observations et les calculs avec un chiffre de plus pour ne pas dégrader la précision avec des erreurs d'arrondi). L'excès sphérique d'un polygone est environ de 1.6 dmgr pour 100 km² de surface. Pour un triangle de 40 km de côtés, il peut atteindre 14dmgr : c'est loin d'être négligeable. Un décimilligrade est l'angle sous lequel, à 40 km, on verrait un objet d'environ 6 centimètres.

Le Global Positioning System (que l'on peut traduire en français par « système de positionnement mondial »), plus connu sous son sigle GPS, est le principal système de positionnement par satellite mondial actuel (2006), et de plus il est également actuellement le seul à être entièrement opérationnel. Ce système mis en place par le Département de la Défense des États-Unis peut permettre à une personne de connaître la position d'un objet sur la surface de la terre dès l'instant que celui-ci est équipé du matériel nécessaire au fonctionnement du système. Cet objet peut être la personne elle-même, lui permettant ainsi de s'orienter sur terre, sur mer, dans l'air ou dans l'espace (au voisinage de la Terre). Le GPS utilise le système géodésique WGS84, auquel se réfèrent les coordonnées calculées grâce au système. Le système GPS comprend au moins 24 satellites artificiels orbitant à 20200 km d'altitude. Ces satellites émettent en permanence un signal complexe (code pseudo-aléatoire) daté

précisément grâce à leur horloge atomique, ainsi que des éphémérides permettant le calcul de leurs coordonnées prédites. Ainsi un récepteur GPS qui capte les signaux d'au moins quatre satellites peut, en mesurant les écarts relatifs des horloges, connaître sa distance par rapport aux satellites et, par trilatération, situer précisément en trois dimensions n'importe quel point placé en dessous des satellites GPS (avec une précision de 15 à 100 mètres pour le système standard). Concernant la précision, le GPS étant un système développé pour les militaires américains, certaines informations pouvaient être chiffrées et priver les personnes qui ne disposent pas des codes de la précision maximale. Depuis mai 2000, cette dégradation volontaire du service a été supprimée et il est courant maintenant d'avoir une position précise à 20 mètres ou moins. Certains systèmes GPS conçus pour des usages très particuliers peuvent même fournir une localisation à quelques millimètres près. Le GPS différentiel (DGPS), corrige ainsi la position obtenue par GPS conventionnel par les données envoyées par une station terrestre de référence localisée très précisément. D'autres systèmes autonomes, affinant leur localisation au cours de 8 heures d'exposition parviennent à des résultats équivalents.

5.2.2. Les données sur l'occupation des sols

Ce paramètre influe directement sur le coefficient de ruissellement. Une surface bâtie favorisera plutôt le ruissellement. En effet, la rétention de la pluie dans ces structures est quasiment nulle et l'eau ne peut s'infiltrer. Pratiquement toute l'eau ruisselle si elle n'est pas captée par un réseau d'eaux pluviales.

En ce qui concerne les sols agricoles, ils montrent une grande variabilité au ruissellement. Les cultures et pratiques culturales peuvent contribuer à aggraver les phénomènes de ruissellement. La ventilation des grands types de cultures au sein des exploitations a des conséquences sur le ruissellement érosif. Dans les régions limoneuses du nord de l'Europe, les systèmes de polyculture-élevage ont été progressivement remplacés par des systèmes uniquement tournés vers la culture, évolution qui a conduit à une diminution des surfaces en herbe. Or, les prairies jouent un rôle particulièrement important : les parties aériennes protègent la surface du sol de la battance et les racines l'horizon de surface de l'incision. Elles permettent ainsi de réduire à la fois le ruissellement et l'érosion.

Sur les parcelles cultivées, l'agriculteur, par les itinéraires techniques et les successions de culture qu'il applique, crée une diversité d'états de surface, en interaction avec le climat, qui se succèdent au cours de la campagne culturale et donc les capacités d'infiltration vont varier au cours du temps. En période de culture lorsque le développement de la végétation est important, l'eau de pluie sera en grande partie absorbée pour les besoins de la plante. En outre, l'encombrement de la parcelle par les structures végétales est un frein au ruissellement. Par contre, après la récolte, le sol nu et tassé va favoriser un déclenchement rapide du ruissellement. Le ruissellement pourra être d'autant plus important que la récolte sera effectuée juste avant une période propice aux événements pluvieux intenses. Selon les états de surface obtenus, les effets sur le ruissellement et l'érosion sont donc différents. De plus, si les états de surface varient dans le temps, ils se répartissent également de façon différente dans l'espace, en raison de l'organisation spatiale des systèmes de

culture, ce qui limite ou accroît le ruissellement et l'érosion. Il importe donc d'avoir une idée la plus précise possible de l'occupation des sols sur les versants ou les bassins versants. Plusieurs possibilités existent pour acquérir cette information sur des territoires assez vastes pour lesquels un suivi de terrain minutieux est impossible.

Les données issues de la télédétection

Le programme européen CORINE Land Cover a permis d'obtenir une base de données harmonisée sur l'occupation du sol pour l'ensemble du territoire de l'Union Européenne (Bossard et al., 2000). Elle a été réalisée dans le cadre d'un programme européen piloté par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE). Ses principales caractéristiques sont :

- une méthode de production basée sur la photo-interprétation d'images satellitaires Landsat et Spot, avec diverses données d'appui (photographies aériennes, cartes topographiques...);
- l'échelle de travail est du 1/100 000ème pour la version vecteur. La résolution est de l'ordre de 25 ha pour la prise en compte des unités cartographiées. Une version maillée est disponible auprès de l'Agence Européenne de l'Environnement.
- une nomenclature hiérarchisée en 44 postes ;
- le résultat prend la forme d'une base de données exploitable à l'aide d'un système d'information géographique (SIG)
- la version 1990 est basée sur des images prises entre 1987 et 1994, la version 2000 porte majoritairement sur 2000, complétée en 1999 et 2001.

Pour la France, la mise à jour de CORINE Land Cover dite CLC 2000 est disponible depuis 2004 auprès de l'Institut Français de l'Environnement (www.ifen.fr). C'est un véritable référentiel d'occupation du sol, mieux « calé » sur la BD cartographique de l'IGN, et proche par la date des recensements français de la population (1999) et de l'agriculture (2000). En comparant l'ancienne et la nouvelle version, il est possible de mettre en évidence les zones où l'occupation du sol a évolué (extension des villes et des forêts, recul des prairies, création d'autoroutes, etc.) si les modifications s'étendent sur une superficie supérieure à 5 ha.

Il est également possible d'acquérir directement des images et d'en faire soi-même l'interprétation afin d'avoir une nomenclature plus détaillée que celle proposée dans CORINE Land Cover mais cela représente un coût non négligeable d'acquisition et de traitement qui réserve ce genre d'approche pour des études sur de relativement petites surfaces. La résolution des images Spot 5 permet en effet l'identification très précise de l'habitat individuel et des cultures et autres occupations du sol à l'échelle de la parcelle.

Les données statistiques sur l'occupation des sols

Il y a un grand nombre de données statistiques qui sont construites à partir de déclarations des agriculteurs, d'observations directes, ou encore d'un mélange d'observations et d'expertise. Il existe également des données administratives, qui sont recueillies par des organismes divers (DGI, organismes sociaux tels que la Mutualité Sociale Agricole [MSA], mais aussi organismes professionnels assurant la gestion du secteur). Mais ces derniers fichiers ne sont pas soumis au même contrôle de qualité des données que les fichiers statistiques, ni à l'obligation d'assurer une continuité des données. Par conséquent, les définitions de base peuvent évoluer d'une année sur l'autre, et ces fichiers doivent être utilisés avec de grandes précautions (Le Bas et al., 2005).

Les données d'enquêtes sur l'occupation des sols

L'enquête Teruti, réalisée par le SCEES depuis le début des années 70, est une source essentielle d'estimation des surfaces agricoles et de leur utilisation pour l'ensemble du territoire français. Leur intérêt par rapport à d'autres types d'enquêtes est qu'elle permet de reconstituer les dynamiques d'occupation du sol pour un échantillon de points constants du territoire et donc les successions culturales.

Chaque point est décrit à la fois

- par son utilisation fonctionnelle : la nomenclature compte 3 grandes classes et 25 postes, par ex : production primaire (minière, agricole, ligneuse, etc.).
- par son occupation physique : la nomenclature compte 81 postes répartis en 7 grandes classes (sols bâtis, sols à couverture boisée, sols agricoles utilisés, etc.)

L'enquête Teruti sur l'utilisation du territoire est réalisée par sondage, sur un échantillon de plus 555 000 points du territoire français. Ces points sont déterminés par un tirage systématique à deux degrés, qui assure une répartition satisfaisante de l'échantillon sur l'ensemble du territoire. Le premier degré concerne le tirage des photographies aériennes. Il revient à recouvrir la France d'un quadrillage de mailles, de 12 km x 12 km chacune, dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest. Le nombre de mailles est de 4 700. A l'intérieur de chacune de ces mailles, huit photographies de position fixe ont été prévues. En règle générale, du fait de contraintes de coût, seules sont retenues les photographies des positions 1, 2, 3 et 4, distantes les unes des autres de 6 km environ. Le deuxième degré concerne le tirage des points d'observation. Il revient à reporter, sur chaque photographie aérienne retenue, une grille de 36 points à enquêter, alignés 6 par 6 de façon régulière. Sur le terrain, ces points sont distants les uns des autres d'environ 300 mètres. Chacun couvre une surface unitaire d'environ 9 m² (3m x 3 m). Ce sont ces points que les enquêteurs vont localiser de manière précise sur le terrain, et relever l'occupation physique du sol et son utilisation fonctionnelle. L'échantillon ainsi constitué compte 15 579 photographies aériennes et 555 903 points sur le territoire métropolitain.

L'échantillon permanent a été renouvelé en 1991-1992 afin de corriger certains biais de représentativité introduits lors du tirage des photos du précédent échantillon. L'enquête Teruti fournit donc deux séries de données historiques continues : la série 1982-1990 et la série 1992-2003. En 2005, Teruti a de nouveau complètement évolué. Les progrès techniques en matière de numérisation des documents cartographiques et de géoréférencement des points ont conduit à redéfinir l'échantillonnage des points Teruti. La localisation de ces derniers, déterminée de façon manuelle sur des photos aériennes, était en effet difficile à suivre précisément dans le temps, ce qui générerait des erreurs d'observation. Par ailleurs, la mise en place de l'enquête européenne Lucas (Land Use/Cover Area frame statistical Survey) fondée sur les mêmes principes que Teruti (enquête aréolaire à deux degrés de tirage) a incité à procéder à une refonte en profondeur de Teruti afin de permettre une cohérence sur la nomenclature, la méthode d'observation et la conception de l'échantillon. C'est pourquoi la décision a été prise de faire évoluer Teruti vers une nouvelle enquête Teruti-Lucas qui répondra à de nouvelles demandes tout en assurant la continuité avec Teruti.

Ces données sont très intéressantes car elles permettent non seulement l'analyse de l'occupation du sol et de son évolution mais aussi l'identification des successions de cultures. Pour cela, il faut utiliser des programmes de fouilles de données temporelles basés sur des modèles stochastiques développés pour l'analyse de séquences et d'images : les modèles de Markov cachés. Ces modèles tels que ceux regroupés dans le logiciel CarottAge®, mis au point par le LORIA³ permettent de représenter des observations temporelles comme des successions d'états où les transitions entre états dépendent, suivant l'ordre du modèle, de l'état courant et des états voisins (Mari et al, 2002). Sans s'étendre sur les logiques propres à ces modèles, nous signalerons simplement que les modèles utilisés se déclinent en deux catégories :

- les modèles ergodiques, pour lesquels on peut distinguer des "états de Dirac", c'est-à-dire des états individuellement associés à une seule culture (ou séquences de cultures) pour lesquels le modèle cherchera une probabilité de 1 et de 0 pour toutes les autres cultures. Ce sont ces modèles qui permettent de représenter sous forme graphique les transitions annuelles entre cultures (ou entre couples ou triplets de cultures).
- les modèles linéaires : ces modèles considèrent l'ensemble des cultures avec la même probabilité. Ils permettent ainsi de rendre compte de la distribution des cultures entre un intervalle de temps que l'on peut déterminer. Ces modèles permettent d'obtenir en sortie un "listing" de cultures (ou de séquences de cultures) associées à une probabilité que l'on peut traduire en pourcentage de surface.

Grâce aux modèles de Markov, on peut donc extraire d'un corpus de données Teruti une probabilité moyenne d'occupation du sol pour une période donnée (ex : moyenne pour toute la période 1992-2000), ou l'évolution de l'assolement année par année. En effet, les modèles linéaires peuvent permettre de segmenter le fichier d'entrée en autant de périodes qu'il compte d'années d'enquête. On obtient ainsi une représentation fine de phénomènes plus ponctuels dans le temps, comme l'effet de la

³ LORIA : Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications

Réforme de la PAC en 1992 (sur les surfaces en jachères notamment). Il est possible également, pour un secteur donné, de représenter les principales transitions annuelles entre cultures grâce aux modèles ergodiques qui génèrent des graphiques permettant de visualiser rapidement les caractéristiques d'une zone agricole.

Les données administratives sur l'occupation des sols

Les données PAC sont issues des dossiers de demande de paiements compensatoires dans le cadre de la Politique Agricole Commune (PAC). Depuis 1992, pour toucher les primes compensant la baisse des paiements directs, les agriculteurs sont contraints de déclarer annuellement les surfaces des cultures implantées sur le territoire de chaque commune où ils exploitent des terres. Dans sa déclaration, l'agriculteur définit des îlots de culture (ensemble de parcelles regroupées par l'agriculteur dans une même commune). Pour chaque îlot, il déclare les surfaces de chaque culture. L'information disponible correspond à une agrégation par commune des surfaces de chaque culture de l'ensemble des îlots déclarés sur la commune par les agriculteurs. La nomenclature utilisée détaille les cultures primées (blé, colza, tournesol, maïs, gel, lin, STH, etc.) mais globalise les surfaces des cultures non primées sous une rubrique « Autres utilisations du sol », laquelle comprend des occupations très diverses en fonction des régions (vergers, betteraves, pomme de terre, etc.). Ces données, dont la fréquence de mise à jour est annuelle (les données de l'année n sont disponibles à l'année $n+1$), sont recueillies et informatisées au niveau des DDAF, puis transmises à l'Office National Interprofessionnel des Céréales (ONIC) qui les commercialise depuis 1995 (www.onic.fr).

Il faut préciser que les dossiers PAC ne permettent pas d'avoir une vision complètement exhaustive de l'occupation des sols d'une région puisque les propriétaires non agricoles, les doubles actifs, les retraités possédant moins de 4,8 ha, les arboriculteurs ainsi que les petits exploitants ne remplissent pas de dossiers. Par ailleurs, les communes dans lesquelles il y a moins de 3 agriculteurs déclarant leurs surfaces ne sont pas présentes dans la base pour préserver le secret statistique. Avec cette base, il est possible non seulement de caractériser l'organisation spatiale du territoire et son évolution mais aussi de les utiliser pour produire des indicateurs de risque. Ces données permettent également de cartographier des informations supplémentaires sur les flux géographiques agricoles. En effet, avec les données PAC, il est possible de connaître, la commune du siège d'exploitation de la totalité des utilisateurs du territoire agricole d'une commune X puisque contrairement au RGA, les surfaces déclarées annuellement par les agriculteurs sont attribuées à une commune en fonction de la localisation réelle des parcelles. On peut ainsi avoir une vision globale de la dispersion géographique des agriculteurs dans les communes et cela aussi bien pour la SAU totale que pour chaque occupation du sol prise individuellement.

Depuis 2005, la réglementation communautaire impose à chaque Etat membre de disposer d'un système d'information géographique informatisé pour l'identification des parcelles agricoles. Afin de répondre à cette exigence, un système de déclaration graphique a été mis en œuvre sur toute la France en remplacement du registre parcellaire cadastral : là où l'exploitant devait décrire ses parcelles sur un registre cadastral, il reçoit désormais les photos aériennes numérisées couvrant son

exploitation pour y dessiner les îlots qu'il exploite. Une base de données stocke les tracés des îlots qui seront reportés sur des photographies aériennes actualisées l'année suivante afin d'aider l'exploitant dans la mise à jour de ces tracés. Le ministère de l'Agriculture et de la Pêche a confié la mise en œuvre de ce registre parcellaire graphique à l'Onic [ONIC 2003].

Les informations contenues dans le registre parcellaire cadastral ne sont pas facilement accessibles même pour de simples activités de recherche à moins de travailler dans le cadre d'un projet européen. Or, c'est une source d'information très intéressante pour connaître l'usage des terres agricoles et qui ne nécessite pas de compétence particulière pour l'utiliser contrairement aux images de télédétection qu'il faut savoir interpréter. Par contre, il est dommage que le passage du registre cadastral sous forme de listes de parcelles à la cartographie ait amené à changer le dispositif de localisation des terres. Elle ne se fait plus sur la base des parcelles mais des îlots regroupant plusieurs parcelles cultivées par un même exploitant. Or, lorsqu'on étudie les problèmes environnementaux tels que le ruissellement érosif où l'influence des pratiques agricoles appliquées à chaque parcelle peut aggraver ou réduire le risque au sein même du territoire agricole, il est essentiel de garder ce niveau de segmentation d'autant plus qu'il représente aussi un niveau de décision pour l'agriculteur.

6. La « bancarisation » des zonages de l'aléa érosif

L'obligation de mise en place de zonages de l'aléa érosif au niveau départemental, pose un certain nombre de questions. Comment capitaliser au niveau national, des données élaborées au niveau local ? Comment les pérenniser et comment gérer l'accès du public aux données correspondantes ? La bancarisation des zonages de l'aléa érosif à l'échelle nationale permettrait de répondre à ces questions et d'assurer les fonctions de diffusion de l'information environnementale ou plus spécifique aux sols, comme le prévoient un certain nombre de documents réglementaires : la convention d'Aarhus et la Directive INSPIRE au niveau européen, la Charte de l'environnement adossée à la constitution française, la Directive cadre de protection des sols européens.

La France a adopté la convention d'Aarhus le 25 juin 1998, confortant les dispositions concernant l'information du public dans le domaine environnemental. Entrée en vigueur le 6 octobre 2002, la convention se décline selon les trois axes suivants :

- développer l'accès du public à l'information détenue par les autorités publiques (diffusion transparente et accessible des informations fondamentales),
- favoriser la participation du public à la prise de décisions ayant des incidences sur l'environnement, dès le début d'une procédure d'aménagement,
- étendre les conditions d'accès à la justice en matière de législation environnementale et d'accès à l'information.

Le projet de Directive du Parlement Européen et du Conseil établissant une infrastructure d'information spatiale dans la Communauté (INSPIRE - The INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe) (COM(2004) 516 final), a été adopté le 13 juin 2006. Cette directive a pour objectif de mettre à disposition des données spatiales de meilleure qualité pour la mise en oeuvre des politiques environnementales dans les États membres. La proposition est principalement axée sur les informations nécessaires pour surveiller et améliorer l'état de l'environnement et notamment le sol. La directive prévoit d'établir une infrastructure d'information spatiale dans la Communauté, en proposant de mettre en place des mesures concernant la disponibilité, la qualité, l'organisation, le partage, l'accès ainsi que l'utilisation de données spatiales interopérables.

L'article 7 de la Loi constitutionnelle relative à la **Charte de l'environnement**, adopté le 28 Février 2005 mentionne quant à elle, que « Toute personne a le droit, dans les conditions et les limites définies par la loi, d'accéder aux informations relatives à l'environnement détenues par les autorités publiques et de participer à l'élaboration des décisions publiques ayant une incidence sur l'environnement ».

La Commission européenne a adopté le 22 septembre dernier la Stratégie thématique de protection des sols européens (COM (2006) 231 final) et proposé la Directive cadre (COM (2006) 232 final) amendant la directive 2004/35/CE. Elle a pour objectif de mettre en place une stratégie commune pour la protection et l'utilisation durables des sols. L'article 6 porte notamment sur le recensement des zones exposées à des risques d'érosion. Il invite les États membres dans un délai de cinq ans à compter de la date de transposition de la directive cadre, à recenser « au niveau approprié, sur leur territoire respectif, les zones dans lesquelles il est patent ou hautement probable qu'un ou plusieurs des processus de dégradation s'est produit ou risque de se produire ». De plus, l'article 16 invite les États membres à communiquer les zones à risques à la Commission dans un délai de huit ans à compter de la date de transposition de la directive cadre et tous les cinq ans par la suite.

Enfin, l'Ifen (Institut Français de l'Environnement) a pour mission d'organiser et d'animer la collecte et le traitement des données sur l'environnement et les risques naturels et technologiques en vue de la production et de la diffusion de l'information sur l'environnement. L'Ifen produit des statistiques nationales et des indicateurs sur les sols pour sensibiliser le public aux problématiques environnementales contemporaines, en alimentant les productions de l'Ifen tels que :

- le Rapport sur l'Etat de l'Environnement : publié tous les 4 ans il fait un état des lieux approfondi sur l'environnement (dernière publication octobre 2006),
- le rapportage des statistiques nationales à l'Agence Européenne de l'Environnement,
- les 4 pages de l'Ifen : destiné à un public non spécialiste, ils font le point sur une question d'environnement de manière descriptive et explicative, en s'appuyant sur les dernières données disponibles et sur les connaissances scientifiques actuelles,
- la rubrique web « Données Essentielles » qui présente les données statistiques de référence sur l'environnement en France assorties des commentaires et explications nécessaires à leur compréhension et de références bibliographiques et de liens vers les sites Internet des sources de données.

La collecte des zonages réalisés au niveau local dans chaque département et leur bancarisation dans une base de données sur un serveur national est donc un enjeu national et européen (Illustration 24). Cette collecte doit en effet répondre à différents besoins :

- agréger les zonages au niveau national
- capitaliser les zonages cartographiques permettant à terme d'obtenir une cartographie exhaustive du zonage de l'aléa érosif à l'échelle de la France métropolitaine et des Dom-Tom,
- veiller à la qualité de l'information diffusée,

- gérer les questions d'interopérabilité entre les différents organismes intervenants dans le domaine des politiques environnementales de prévention du risque érosif au niveau nationale et entre les différents Etats membres de l'Union Européenne (gestion conjointe des zonages dans les zones frontalières, ...),
- harmoniser les données au niveau national et européen,
- faciliter la mise à jour des zonages,
- diffuser et informer le public sur les zonages de l'aléa érosif, au moyen d'un guichet unique.

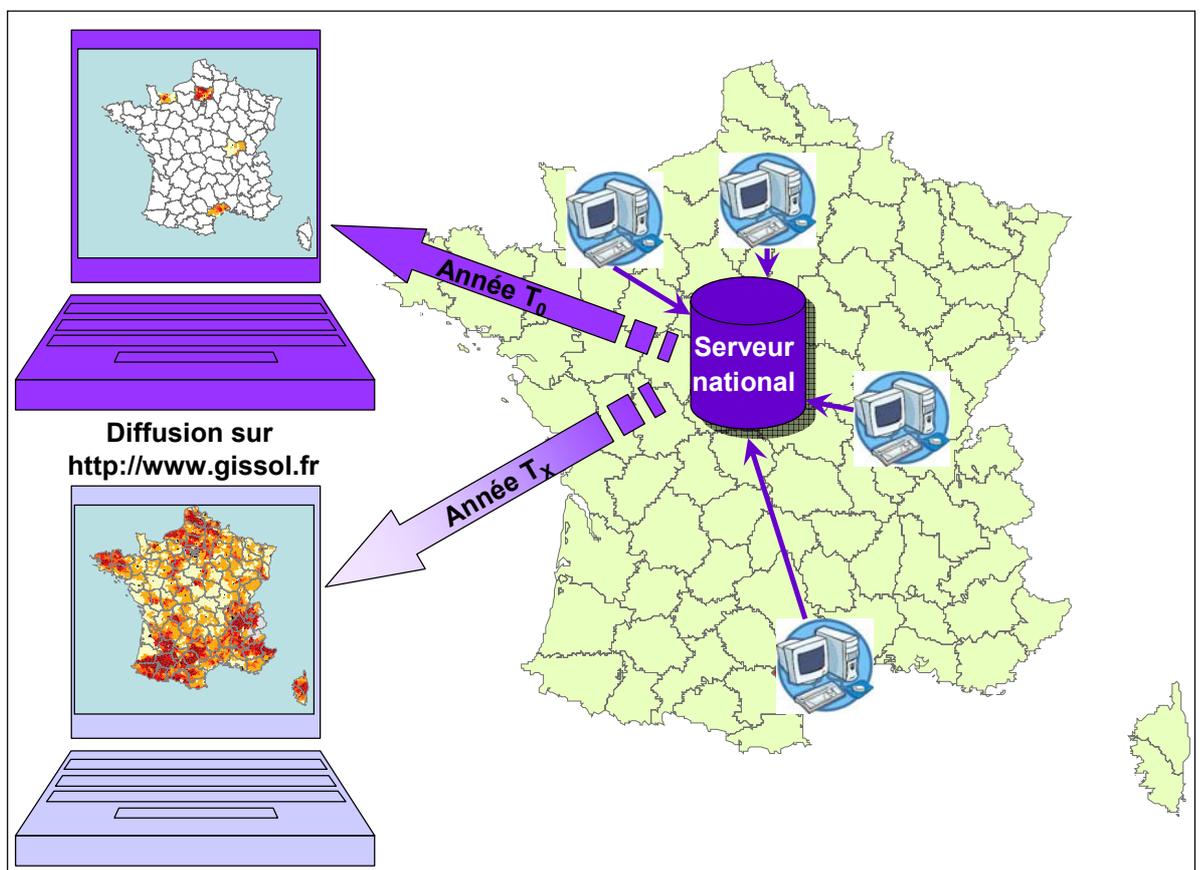


Illustration 24 : Schéma organisationnel de la bancarisation des données : les données élaborées au niveau départemental doivent être thésaurisées, harmonisées, diffusées, inter-opérables au niveau national et européen. La structure existante du Gis Sol permettrait de répondre à ces besoins.

La structure existante du Gis Sol permettrait de répondre à ces besoins. Le Gis Sol (Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols), créé en 2001, regroupe le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP), le Ministère de l'Ecologie et du Développement

Durable (MEDD), l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), l'Institut Français de l'Environnement (IFEN), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Son objectif est de constituer et de gérer un système d'information sur les sols de France, répondant à échéance réaliste aux besoins régionaux et nationaux, dans le contexte européen. Le Gis Sol organise la concertation et la coopération entre ses membres dans le but de concevoir, orienter, coordonner, et s'assurer que se réalisent dans les meilleures conditions, des actions d'inventaire géographique des sols, de suivi opérationnel de leurs qualités, de création et de gestion d'information répondant aux demandes des pouvoirs publics et de la société. Le Gis Sol assure ainsi d'ores et déjà le rôle de guichet unique quant à la diffusion d'information géographique sur les sols, via son serveur cartographique.

7. Conclusion

L'objectif finalisé qui a sous-tendu le montage et la réalisation de cette étude est l'établissement d'un guide méthodologique pour la réalisation de zonages de l'érosion des sols à l'échelle départementale. Cet objectif doit de plus aider à un positionnement tenant compte des différentes orientations actuelles qui renforcent la prise de conscience d'un objet « sol » et la nécessité de le protéger.

Le contexte actuel, que ce soit au travers de la loi « Bachelot » sur les risques ou la proposition européenne de directive cadre sur la protection des sols, nous rappelle en effet l'importance des enjeux soulevés par les phénomènes d'érosion des sols. Pour prendre en compte cette menace sur les sols et leur aptitude à remplir leurs fonctions essentielles, **la première étape consiste à établir une cartographie régionale** de la probabilité d'occurrence de phénomènes érosifs. Cette cartographie permettra de rationaliser et cibler les efforts à fournir dans la mise en place de politiques cohérentes de gestion de l'espace.

Les différentes études scientifiques répertoriées qui traitent de la modélisation de l'aléa érosif sur de grandes surfaces ont montré la complexité des processus en cause d'une part, et la faible disponibilité de données spatialisées à haute résolution d'autre part. Pour satisfaire notre objectif, ces travaux plaident très majoritairement pour l'utilisation de structures de modélisations simples qui se basent sur un faible nombre de paramètres d'entrées.

La méthodologie développée par l'INRA au niveau national, et déclinée au niveau européen, répond à ces critères. Nous avons donc effectué toute une série de tests afin de définir et préciser les conditions optimales d'utilisation de cette méthodologie à l'échelle départementale.

Au niveau de la structure même du modèle, les réflexions et les études de sensibilité du modèle menées dans le cadre de ce contrat sur deux départements contrastés (Oise : Surdyk et al., 2006 ; Hérault : Desprats et al., 2006) ont mis en avant **le caractère robuste et la simplicité d'utilisation de la méthode** basée sur des règles expertes ordonnées et hiérarchisées au sein d'un arbre de décision. **La fiabilité des résultats a été validée** sur les deux régions par l'appel à des expertises locales. Au niveau des données d'entrées, les recommandations constituant **la base d'un cahier des charges génériques** portent sur :

- La couverture d'occupation du sol CORINE Land Cover au 1/100 000.
- Une carte des sols ou des pédo-paysages au 1/250 000 si elles sont disponibles. Pour les départements encore en attente de ces données, elles pourront être remplacées par des campagnes de mesures des paramètres nécessaires à l'établissement des différentes règles, en fondant la stratégie

d'échantillonnage sur une stratification issue des cartes géologique au 1/50 000.

- Un modèle numérique d'altitude à 50m de résolution.
- La base de données des hauteurs de pluies moyennes AURELHY accompagnée des statistiques sur le nombre de jours (par saison climatique) où le seuil de 15 mm/h est atteint pendant au moins une heure.

Dans plusieurs régions pourra se présenter l'éventualité de bases de données spécifiques plus adaptées aux particularismes physiques ou climatiques locaux, mais se pose alors le problème d'une cartographie de l'aléa homogène au niveau national qui permette des comparaisons entre départements.

Une fois identifiées les zones les plus exposées à l'érosion, nous avons cherché à définir les critères les plus pertinents pour **la mise en place de moyens de lutte** pour prévenir ou limiter les phénomènes érosifs. Au niveau technique, tout un panel de mesures existe qui a déjà été documenté au cours d'études antérieures et qui n'a donc pas été repris ici. Par contre la mise en œuvre de ces mesures en tenant compte des intérêts, parfois antagonistes, des différents acteurs évoluant à l'échelle du paysage est plus problématique. Les pistes qui se dégagent actuellement mettent en avant trois points forts :

- Les solutions techniques ne sont pas uniques et une lutte efficace ne peut se faire qu'au travers d'une **combinaison de différents types de mesures, qui allient** des mesures non structurales sur les terres amont avec des mesures d'hydraulique douce et des aménagements de rétention en aval des zones émettrices.
- La gestion de l'aménagement doit être **collective** à l'échelle des bassins versants.
- Pour cela il y a nécessité de la mise en place de méthodes **participatives** de gestion de l'espace.

Enfin nous avons également souligné l'intérêt qu'il y aurait à réaliser un **archivage central des différentes cartographies** de l'aléa érosion qui pourront être réalisées au sein d'organisme fédérateur tel le GISSOL. A terme, une perspective intéressante serait de mettre en place un système interactif, laissant la possibilité à des experts locaux désignés de venir corriger et actualiser les cartographies archivées.

En guise de perspectives, on peut citer plusieurs difficultés qui nous sont apparues au travers de cette étude si on se place dans l'optique de l'établissement d'une politique de gestion durable des sols, particulièrement en ce qui concerne le risque érosif :

- **pour l'obligation de recensement** : la nécessité de disposer de façon exhaustive au plan spatial de paramètres sur les sols va être un problème récurrent. L'absence de données cohérentes peut être compensée par des

solutions alternatives intégrant des sources de données diverses (cartes pédologiques, géologiques, autres), des méthodes innovantes de métrologie spatialisée in situ ou distantes, enfin des méthodes cohérentes de spatialisation de l'information.

- **pour le choix des mesures à mettre en place** : la visibilité est encore insuffisante. sur les enjeux économiques relatifs à ces menaces, dont celle de l'érosion. Cette lacune a bien été mise en évidence lors de la réalisation du projet européen « Assessing economic impacts of soil degradation » mise en œuvre par Ecologic & le BRGM. Cette visibilité sera indispensable pour argumenter les choix de solutions techniques de réduction du risque érosif et leur efficacité économique.
- **Pour l'adoption d'objectifs de réduction des risques** et l'établissement de programmes de mesures : il n'y a pas à ce jour de programme de suivi temporel quantitatif de l'érosion en France. C'est une étape incontournable pour étayer les objectifs à fixer. Il y a un réel besoin de lignes de conduites et de coordination adaptées aux diverses situations.

8. Bibliographie

- Aksoy H. & Kavvas M.L., 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, 64:247–271.
- Auzet A.V, Le Bissonnais Y et Souchère V.2006 « chapitre de synthèse Erosion of soils in France » in *Soil Erosion in Europe* John Boardman (Editor), Jean Poesen (Editor) SBN: 0-470-85910-5
- Auzet A.V., 1990 - *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects aménagements*. Centre d'études et recherches éco-géographiques, ministère de l'Environnement / ministère de l'Agriculture, 39 p.
- Auzet A.-V., Lemmel M., 2003. Bassin versant de l'Ibenbach en amont de Landser (68). Occupation et états de surface des sols, collecte et concentration du ruissellement des versants vers le réseau hydrographique. Rapport DIREN Alsace, 9 p.+ 9 cartes
- Auzet, A.V., 1987a. L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Annales de Géographie*, 537: 529-556.
- Auzet, A.V., 1987b. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques. Ministères de l'environnement et de l'agriculture, CEREG URA95 CNRS, 60 p
- Beasley D.B., Huggins L.F. & Monke E.J., 1980. ANSWERS : a model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 938– 944.
- Benichou P & Le Breton O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques : la méthode AURELHY. *Les Colloques de l'INRA*, n° 39. Toulouse, 16-17 avril 1986. pp 51-69.
- Benichou P., Le Breton O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques : la méthode AURELHY. « Agrométéorologie des régions de moyenne montagne », Toulouse, 16-17 avril 1986. Ed. INRA, Paris (Les Colloques de l'INRA, n° 39). pp 51-69.
- Beven K. 2001. How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences* 5 (1): 1-12.
- Boardman, J., 1998. Modelling soil erosion in real landscapes: a Western European perspective. In: J. Boardman and D. Favis-Mortlock (Editors), *Modelling Soil Erosion by Water*. Global Environmental Change. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 17-29.
- Bonafos A., 2005. Enquête européenne sur les pratiques culturales limitant le ruissellement diffus sur grandes cultures. Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes, 102 pages + annexes.
- Bossard M., Feranec J., Otahel J., 2000. CORINE land cover. Technical guide. Addendum 2000. Technical report n°40. Agence Européenne de l'Environnement.

- Bryan, R.B. 2000. 'Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope', *Geomorphology*, 32, 385-415.
- Cartier S. 2000. Chronique d'un déluge annoncé. crise de la solidarité face aux risques naturels. Grasset & Fasquelle, Coll. Essais Français, ISBN 2246614716.
- Cartier S., 1999. Entre recours à l'état et recours au marché, principe de solidarité face au risque de ruissellement érosif en Pays de Caux, Thèse de doctorat de sociologie, Université de Paris X, Nanterre, 485 pp. + annexes.
- Cerdan O, Le Bissonnais Y, Souchère V, Martin P, Lecomte V. 2002a. Concentration of suspended particles in interrill flow. *Earth Surface Processes and Landforms* 27(2): 193–205.
- Collectif Commod, 2006. Modélisation d'accompagnement. In Amblard F. et Phan D. (eds.) *Modélisation et simulation multi-agents : applications aux Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermès-Sciences, 217-228.
- Corine, 1992. Corine soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community, Publication EUR 13233 EN, Luxembourg, 97 pp. + maps.
- Dautrebande S., 2003. Guide méthodologique pour le choix d'aménagements appropriés en matière de conservation des sols et des eaux. Fascicule 2 du rapport final de la Convention, « Etude méthodologique pour la prévention et la correction des problèmes d'érosion et de colluvionnement des terres en zone rurale », 147 p.
- De la Rosa D., Mayol F., Moreno J.A., Bonsón T. & Lozano S., 1999. An expert system/neural network model (ImpelERO) for evaluating agricultural soil erosion in Andalusia region, southern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 73:211–226.
- De Roo, A.P.J. 1996. 'Validation problems of hydrologic and soil-erosion catchment models: examples from a Dutch erosion project'. In M.G. Anderson, S.M. Brooks (eds), *Advances in hillslope processes Volume 1*. John Wiley & Sons pp 669-683.
- De Roo, A.P.J., 1993. Modelling surface runoff and soil erosion in catchment using Geographical Information Systems ; validity and applicability of the 'ANSWER' model in two catchments in the loess area of South Limburg. (The Netherlands) and one in Devon (UK). PhD Thesis, University of Utrecht.
- DeCoursey, D.G., 1985, Mathematical models for nonpoint water pollution control. *Journal of Soil and Water Conservation* 40 (5), 408-413.
- Delahaye D., Langlois P., Gaillard D., Paquet T., Jaziri W., Merle F., Bourgain O., Ducher K., Duhamel J., 2004. Cartographie, évaluation économique et dispositifs administratifs comme instruments d'une appropriation et d'une organisation collective du risque de ruissellement érosif. Rapport final Programme EPR « Evaluation et prise en compte des risques », Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire, 132 p. + annexes.

- Desprats J.F., A. Bourguignon, O. Cerdan, Y. Le Bissonnais, A. Colmar, 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport BRGM-RP-55049, 67 pp., 61 ill..
- Echeverria J., 2006. Modélisation d'accompagnement et gestion des problèmes de ruissellement érosif en Haute Normandie, Mémoire du Master Economie du Développement Durable, de l'Environnement et de l'Energie (EDDEE) – Université Paris X Nanterre, 100 pages + annexes.
- EEA, 2000. Down to earth: Soil degradation and sustainable development in Europe. Environmental Issues Series, 16. 32 pp. European Environment Agency.
- Ellis F., 1996. The application of machine learning techniques to erosion modelling. Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling CD-ROM. January 21-25, 1996, Santa Fe, USA.
- Ermini L., Catani F. & Casagli N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66:327–343.
- Favis-Mortlock, D.T. 1998. 'Evaluation of field-scale erosion models on the UK South Downs', in Boardman, J. and Favis-Mortlock, D. (eds.), *Modelling Soil Erosion by Water*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 43-53.
- Ferro, V., Minacapilli, M. 1995. Sediment delivery processes at basin scale. *Hydrological Sciences Journal* 40 (6), 703-717.
- Folly, A., Quinton, J.N. and Smith, R.E., 1999. Evaluation of the EUROSEM model using data from the Catsop watershed, the Netherlands. *Catena*, 37: 507-519.
- Foster, G.R., 1990. Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In: Boardman, J., Foster, D.L., Dearing, J.A. (Eds.), *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons pp. 429-445.
- Gobin A., Govers G. 2003. Third annual report of the Pan-European Soil Erosion Risk Assessment (PESERA) project. Report to the European Commission. <http://www.jrc.it>
- Gobin A., Govers G., Jones R., Kirkby M., Kosmas C., 2003 - Assessment and report on soil erosion. Background and workshop report Technical report 94. European Environmental Agency, Copenhagen.
- Gobin A., Jones R., Kirkby M., Campling P., Kosmas C., Govers G., Gentile AR. 2004. Pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. *Journal of Environmental Science and Policy* 7, 25-38.
- Hénin, S., Gobillot, T., 1950. L'érosion en France. *Bulletin Technique d'Information*, 50: 431-433.
- Ifen, 1998. Cartographie de l'aléa "érosion des sols" en France. *Etudes et travaux* n°18. INRA/IFEN, août 1998. 63p.
- Inspection générale l'Environnement, 2005. Etude particulière sur les aléas naturels et leurs enjeux. Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles, N° IGE/05/006, 47 pages + annexes.

- Jakeman, A., Littlewood, I., Whitehead, P. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology* 117, 275-314.
- Jakeman, A.J., Hornberg, G.M. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research* 29 (8), 2637-2649.
- Jetten, V., De Roo, A. and Favis-Mortlock, D. 1999. 'Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models', *Catena*, 37, 521-541.
- Joannon, A., 2004. Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques - Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie. Thèse de doctorat, INA P-G, Paris, 230 pages + annexes.
- Kirkby, M.J., Jones, R.J.A., Irvine, B., Gobin, A, Govers, G., Cerdan, O., Van Rompaey, A.J.J., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., Grimm, M., Vieillefont, V., Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., Van Lynden, G.J. and Huting, J. 2004. Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, Version 1 October 2003. Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.73 (S.P.I.04.73). European Soil Bureau Research Report No.16, EUR 21176, 18pp. and 1 map in ISO B1format. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Le Bas C., Souchère V., Laurent C., 2005. Les informations existantes pour renseigner les relations agricultures-territoires. In : Laurent C., Thinon P., (dirs.). *Agricultures et territoires*. Chap. 2. Hermès Sciences Publications, 57-76.
- Le Bissonnais Y. (ed.), Couturier A., Cerdan O., Papy F., Martin P., Souchère V., Bruno J.F., Lebrun P., Fox D., Morschel J., 2003. *Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés : phénomènes physiques et dispositifs d'action*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Paris, 69 p.
- Le Bissonnais Y., C. Montier, M. Jamagne, J. Daroussin, D. King, 2002 a. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46, 207-220.
- Le Bissonnais Y., Dubreuil N., Daroussin J., Gorce M., 2004. Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale, exemple du département de l'Aisne. *Étude et Gestion des Sols* 11, 3: 307-321
- Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D. 1998. *Cartographie de l'Aléa " érosion des sols " en France*. Collection Etudes et travaux, n°18. 63p + CD rom. IFEN, Orléans (<http://www.ifen.fr/erosion/methsom.htm>)
- Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin, J., King D., 1998. *Cartographie de l'aléa érosion des sols en France*. IFEN, Collection Etudes et travaux, n°18. 63p + CD rom.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J. 2002 b. *L'érosion hydrique des sols en France*. 106p (unpublished, available at <http://erosion.oreans.inra.fr/rapport2002/>)

- Letcher, R.A., Jakeman, A.J., Meritt, W.S., McKee, L.J., Eyre, B.D., Baginska, B. 1999. Review of Techniques to estimate catchment exports. EPA technical report 99/73. Environmental protection Authority, Sydney.
- Liczner P. & Nearing M.A., 2003. Artificial neural networks of soil erosion and runoff prediction at the plot scale. *Catena*, 51:89– 114.
- Lilin, C., 1986. Histoire de la restauration des terrains de montagnes au 19ème siècle. *Les Cahiers de l'Orstom, série Pédologie*, vol. XXII, 2: 139-145.
- Litzler C., 1988. Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteaux. Aspects agronomiques. Ministère de l'Environnement / ministère de l'Agriculture, ITV, Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire. 54 p.
- Maret P., 2004. Soil management, water management: scales for conservation strategies, field or catchment? Keynote paper at the 1st joint working group of COST 634, "On- and off-site environmental impacts of runoff and erosion", Bratislava, 8-10 October 2004.
- Mari J.F, Le Ber F., Benoit M., 2002. Segmentation temporelle et spatiale de données agricoles, *Revue internationale de géomatique*, 12(4), 439-460.
- Metternicht G. & Gonzalez S., 2005. FUERO : foundations of a fuzzy exploratory model for soil erosion hazard prediction. *Environmental Modelling & Software*, 20:715-728.
- Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2001. Inondations et coulées boueuses en Seine-Maritime – Propositions pour un plan d'action, rapport d'expertise de l'Inspection générale de l'environnement, Affaire n° IGE/00/032, 66 p.
- Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2003. Plan de prévention des risques naturels (PPR). Risque d'inondation (Ruissellement péri-urbain), Note complémentaire, 38 p. + annexes.
- Mitra B., Scott H.D., Dixon J.C. & McKimmey J.M., 1998. Applications of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed. *Geoderma*, 86:183–209.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A.; Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. and Styczen, M.E., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): an dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 527-544.
- Nearing M.A., Foster G.R., Lane L.J. & Finkner S.C., 1989. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. *Transaction of ASAE*, 32:1587–1593.
- Nearing MA, Govers G, Norton LD. 1999. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Science Society of America Journal* 63(6): 1829–1835.
- Nearing MA, Nicks AD. 1998. Evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for hillslopes. In *Modelling Soil Erosion by Water*. Boardman J, Favis-Mortlock D (eds). Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg; 43–53.

- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J. and Finkner, S.C., 1989. A process-based soil erosion model for USDA : water erosion prediction project technology. *Trans. of the ASAE*, 32(5): 1587-1593.
- Neaupane K.M. & Achet S.H., 2004. Use of back propagation neural network for landslide monitoring: a case study in the higher Himalaya. *Engineering Geology*, 74:213–226.
- Oldeman L. R., Hakkeling R. T. A. and Sombroek W. G., 1991 - *Global world map of the status of human-induced soil degradation (second revised edition)*, ISRIC, Wageningen, UNEP, Nairobi.
- ONIC, 2003. Le registre parcellaire graphique. 4 pages.
- Ouvry J.F., 1992. L'évolution de la grande culture et l'érosion des terres dans le Pays de Caux. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 2:107-113.
- Ouvry, J.-F., 1986. Effet des techniques culturales sur la sensibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré : expérience du Pays-de-Caux (France). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 26(1/2): 157-169.
- Perrin, C., Michel, C., Andreassian, V. 2001. Does a large number of parameter enhance model performance ? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242, 275-301.
- Ramadan Z., Hopke P.K., Johnson M. & Scow K.M. 2005. Application of PLS and Back-Propagation Neural Networks for the estimation of soil properties. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 75:23– 30.
- Rustomji, P., Prosser, I. 2001. Spatial patterns of sediment delivery to valley floors : sensitivity to sediment transport capacity and hillslope hydrology relations. *Hydrological Processes* 15, 10003-1018.
- Shan Y., Paull D. & McKay R.I., 2006. Machine learning of poorly predictable ecological data. *Ecological modelling*, in press.
- Shrestha D.P., Zinck J.A., & VanRanst E., 2004. Modelling land degradation in Nepalese Himalaya. *Catena*, 57:135-156.
- Smith R.E., 1981. A kinematic model for surface mine sediment yield. *Transactions of the ASAE*, 1508–1514.
- Souadi T., King C., Le Bissonnais Y. 2000. Cartographie de l'aléa érosion des sols en Haute-Normandie. BRGM-RP50454-
- Souchère V., King C., Dubreuil N., Lecomte-Morel V., Le Bissonnais Y., Chalot M., 2003. Grassland and crop trends : role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion. *Environmental Science & Policy*, 6: 7-16.
- Steeffel, C.I., Van Cappellan, P. 1998. Reactive Transport Modelling of natural systems. *Journal of Hydrology* 209, 1-7.
- Surdyk N., Cerdan O., Dubus I.G. 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°2 : Etude de sensibilité sur le département de l'Oise. BRGM/RP-55103-FR. 65p.

- Takken I., Govers G., Steegen A., Nachtergaele J., Guerif J. 2001. The prediction of runoff flow directions on tilled fields. *Journal of Hydrology* 248 (1-4): 1-13
- Thorsen, M., Refsgaard, J.C., Hansen, S., Pebesma, E., Jensen, J.B., Kleeschulte, S. 2001. Assessment of uncertainty in simulation of nitrate leaching to aquifers at catchment scale. *Journal of Hydrology* 242, 210-227.
- Tran L.T., Ridgley M.A., Duckstein L. & Sutherland R., 2002. Application of fuzzy logic-based modelling to improve the performance of the Revised Universal Soil Loss Equation. *Catena*, 47:203–226.
- Turk G., Logar J. & Majes B. 2001. Modelling soil behaviour in uniaxial strain conditions by neural networks. *Advances in Engineering Software*, 32:805-812
- Wischmeier, W.H., Smith., S.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *USDA Handbook*, 537: 58.
- Witkowski D., Richet J.B., Ouvry J.F., Saint-Omer L; Coufourier N., Martin P., Lecomte V., Pivain Y., 2004. Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols. Expérimentations sur les pratiques culturales. Chambres d'Agriculture de l'Eure et de la Seine Maritime, Institut Technique de la Betterave, Association Régionale de la Pomme de Terre de Haute Normandie, Association Régionale pour l'Étude et l'Amélioration des Sols, UMR SAD APT (INRA-Institut National Agronomique de Paris-Grignon), 57p.



Centre scientifique et technique
Service ARN
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34