



L'EROSION HYDRIQUE DES SOLS EN FRANCE

Yves LE BISSONNAIS^{*}, Jacques THORETTE^{}, Cécile BARDET^{***}, Joël DAROUSSIN^{*}**

^{*} INRA, Unité de Science du Sol, avenue de la Pomme de Pin, B.P. 20 619, Ardon, 45166 OLIVET cedex - email : yves.le-bissonnais@orleans.inra.fr

^{**} Ifen, 61 bd Alexandre Martin, 45058 ORLEANS cedex 1 – email : jacques.thorette@ifen.fr

^{***} SIGMAP, 1 avenue du chemin neuf, 13114 PUYLOUBIER – email : sigmap@club-internet.fr

Remerciements

Les auteurs remercient toutes les personnes ayant contribué, par leurs remarques ou la fourniture de documents, à l'élaboration de ce rapport ; en particulier l'AREHN (Agence Régionale de l'Environnement de Haute-Normandie).

Les cartes ont été réalisées par Joël DAROUSSIN, INRA Orléans.
La mise en page finale a été assurée par Michèle BELIN, Service des éditions - Ifen.

AVANT-PROPOS	4
CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	6
1.1 L'état des connaissances sur l'érosion hydrique	6
1.2 Les objectifs de l'étude	9
LES PHENOMENES D'EROSION HYDRIQUE.....	10
2.1 Définition des processus et des termes utilisés	10
2.2 Typologie des phénomènes érosifs	10
LES CONSEQUENCES OBSERVEES DE L'EROSION – INVENTAIRE DES « COULEES BOUEUSES »	18
3.1 LES CONSEQUENCES A L'AMONT ET A L'AVAL DES BASSINS VERSANTS	18
3.2 L'inventaire et la cartographie des « coulées de boue »	21
3.3 Evolutions récentes des paysages et risques induits.....	30
MODELISATION DE L'ALEA EROSION	39
4.1 Etapes de la modélisation et de la cartographie	39
4.2 Description du modèle	40
4.3 Cartographie de la typologie des aléas (figure 16)	50
4.4 Analyse des résultats	51
4.6 Validation des résultats	57
4.6 Bilan et perspectives.....	60
MOYENS D'ACTION ET METHODES DE LUTTE CONTRE L'EROSION DES SOLS.....	64
5.1 Aménagements collectifs en amont des zones à risques	65
5.2 Mesures individuelles de lutte contre les effets de l'érosion	68
5.3 Les mesures administratives de lutte contre les effets de l'érosion	76
LES PROBLEMES DE L'EROSION DANS 3 REGIONS TYPES	82
6.1 La lutte contre l'érosion en région de grande culture : exemple de la Haute-Normandie	82
6.2 La lutte contre l'érosion en région de vignoble : exemple de l'Alsace.....	85
6.3 La lutte contre l'érosion en zone urbaine : exemple de l'Ile-de-France	88
CONCLUSION - RECOMMANDATIONS	91
BIBLIOGRAPHIE.....	92
GLOSSAIRE.....	104
CREDITS PHOTOGRAPHIQUES	105
METHODE D'INTEGRATION DE L'ALEA PAR USI	106

AVANT-PROPOS

Les tempêtes (1998-2001) ou les épisodes de fortes précipitations qui ont eut lieu ces dernières années et ont entraîné dans certains cas des pertes en vies humaines, ont été fréquemment accompagnés de coulées boueuses. Celles-ci sont une expression catastrophique du phénomène d'érosion qui affecte aussi bien les zones agricoles (ravinement, coulées de boue submergeant les cultures, etc.) que les infrastructures et installations économiques (chaussées submergées par la boue, etc.).

Dans les zones agricoles, le ruissellement*¹ lié à de fortes précipitations entraîne le départ de terre par érosion, de façon insidieuse en emportant les éléments fertiles du sol, ou de façon spectaculaire en creusant de profondes ravines. Or le sol est une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle de temps historique. La prise en compte de l'érosion des sols dans une politique environnementale et agricole durable représente donc une priorité car elle revêt un caractère **d'irréversibilité**. L'érosion provoque des dégâts aux terres agricoles mais a aussi des conséquences au-delà du sol lui-même, puisqu'elle entraîne une dégradation de la qualité des eaux et le déplacement de sédiments qu'il faut ensuite gérer. Elle est aussi souvent à l'origine de « **coulées boueuses** » qui peuvent entraîner des dégâts importants faisant l'objet de demandes d'indemnisations des particuliers ou des collectivités, au titre des catastrophes naturelles.

Remarque : Le terme de « **coulée boueuse** » est entendu ici comme un écoulement fortement chargé en sédiments, provenant des surfaces cultivées et entraînant des particules de sol. En règle générale, cet écoulement n'est ni visqueux ni épais. Ce terme peut prêter à confusion, notamment en région de montagne où il désigne aussi certaines formes de mouvements de masses. Néanmoins, il est utilisé dans ce document chaque fois qu'il s'agit de désigner le phénomène en privilégiant le point de vue administratif, car il s'agit du terme retenu dans le questionnaire rempli par le maire lors d'une « catastrophe naturelle ». Le terme « d'écoulement boueux » est utilisé lorsqu'il s'agit de privilégier le point de vue scientifique.

Ce document traite des problèmes d'érosion dans les zones agricoles, et n'aborde ni l'érosion des berges des cours d'eau, ni l'érosion des régions de haute montagne qui relèvent de facteurs et de processus différents.

L'objectif de ce document est de **faire la synthèse des données existantes sur l'érosion des sols à l'échelle du territoire français** et de diffuser plus largement ces connaissances au sein des régions pour aider les acteurs locaux à mieux comprendre et à lutter contre les risques liés à l'érosion des sols. Il reprend, remet à jour, développe et compare les études suivantes :

- **La « Cartographie de l'aléa érosion des sols en France »** (INRA, Ifen, 1998), qui présente une cartographie exhaustive de l'aléa* érosion des sols sur la France entière. Elle est obtenue à partir d'un modèle utilisant les données les plus précises disponibles pour le territoire national métropolitain et s'appuie sur les connaissances les plus récentes des processus impliqués dans les phénomènes d'érosion hydrique des sols. Cette cartographie rend à la fois compte de l'intensité de l'aléa et des types érosifs correspondants, afin de faire ressortir les spécificités régionales.
- **« L'inventaire des coulées de boue en France de 1985 à 1995 »** (Collectif, 1996, non publié), qui met en évidence l'importance des phénomènes d'érosion des sols dans la plupart des régions de France, bien au-delà des zones classiques de montagne ou de la bordure méditerranéenne. Cette étude recense, par commune, les « coulées de boue » ayant fait l'objet d'une demande d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles. Elle comporte aussi une synthèse bibliographique sur les travaux de

¹ Les mots suivis d'une astérisque sont définis dans le glossaire page 104.

protection contre l'érosion des sols, et les mesures expérimentales appliquées localement pour limiter les dégâts de l'érosion.

- « **Le sol, un patrimoine à ménager** » (Ifen, *les données de l'environnement* n° 38, 1998, 4 pages).

La présente étude s'articule autour de la modélisation de l'aléa d'érosion, et de sa validation par comparaison avec les résultats de l'inventaire des « coulées de boue ». A travers les exemples régionaux qu'elle contient elle plaide pour une approche régionale plus précise du problème de l'érosion. Elle fait également une place à la prévention et à la remédiation en évoquant les moyens de moyens de lutte qui sont mis en œuvre aujourd'hui dans les régions.

L'érosion des sols : un enjeu européen

La Commission des Communautés Européennes (CCE) a reconnu dans un récent document (16/04/2002 ; « *Vers une stratégie thématique pour la protection des sols* ») que l'érosion des sols pouvait être « considérée, avec différents degrés de gravité, comme un problème rencontré dans toute l'Union Européenne (UE) ». Elle rapporte dans son document les dires d'experts : « 26 millions d'hectares dans l'UE souffrent de l'érosion par l'eau et 1 million de l'érosion par le vent ». La CCE qualifie l'érosion de « défi important ».

Par ailleurs la législation communautaire, en particulier sur l'eau, (Directive « Nitrates » et directive-cadre sur l'eau) pose le cadre de mesures correctives à la dégradation des sols notamment pour l'érosion susceptible de contribuer à la contamination des eaux de surface et souterraines. D'autres textes européens en préparation en septembre 2002 seraient susceptibles de rendre nécessaire une connaissance approfondie de l'ampleur du phénomène d'érosion des sols en France. Il s'agit notamment de celui ayant pour titre « *Aménagement du territoire et environnement – la démarche territoriale* », qui intégrera un certain nombre d'aspects concernant les sols.

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

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 (voir encadré), 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. Des cartes à différentes échelles ont pu être dressées figurant soit le phénomène érosif lui-même, soit les risques d'érosion potentiels.

« Simulation de la pluie » et érosion

Pour mieux comprendre les transferts de matière, apprécier et quantifier l'influence des différents paramètres intervenant lors d'une pluie à la surface et dans les premiers décimètres du sol un laboratoire expérimental a été conçu à l'INRA d'Orléans. Le dispositif permet de simuler des pluies de différentes intensités (10 à 60 mm/h) sur des échantillons de sol correspondants à la « surface élémentaire représentative » d'une parcelle cultivée (10 m² sur 0,3 m de profondeur), avec une pente variant de 0 à 20%. Les mesures effectuées ont pour objectifs principaux l'acquisition de références expérimentales nécessaires à l'élaboration de modèles (stabilité structurale, formation des croûtes de battance, mobilisation des particules et polluants par le ruissellement et l'érosion diffuse).

Les principaux thèmes de recherche concernés sont :

- Etude de la dynamique de la structure de surface des sols cultivés.
- Influence de l'état structural sur le partage infiltration-ruissellement.
- Rôle de la rugosité de surface sur la détention et le ruissellement.
- Influence du couvert végétal et des résidus sur la transformation de la pluie et la redistribution de particules (terre, spores, pesticides).
- Transfert de particules solides et de polluants à la surface du sol.
- Résistance mécanique de la surface des sols à l'incision par le ruissellement.

contact : lebisson@orleans.INRA.fr



Photographie 1 : Vue du simulateur de pluie installé à l'INRA d'Orléans ; Y. Le Bissonnais.

1.1 L'état des connaissances sur l'érosion hydrique

Les études cartographiques aboutissent à deux types de cartes :

- des cartes d'érosion, basées sur des observations ou des synthèses bibliographiques ;
- des cartes de « risques d'érosion » (pris dans le sens de l'aléa naturel), résultant de la modélisation du fonctionnement des phénomènes.

Les cartes d'érosion des sols

Les cartes d'érosion des sols ont été réalisées à partir de phénomènes constatés d'après des observations ou des données existantes :

- cartographie des zones d'érosion sous forme de quelques grandes unités, d'après la bibliographie existante (Hénin et Gobillot, 1950 ; Auzet, 1987) : érosion de grandes cultures, érosion de vignobles et de vergers sur coteaux ou sur pentes fortes ;
- carte de l'érosion des sols divisée en 4 thèmes (érosion par l'eau, érosion éolienne, glissements de terrain et bad-lands), pour l'Ouest de l'Europe (De Ploey, 1989).

Ces études ont été les premières à avoir traité de l'érosion des sols à l'échelle de la France mais elles ne délimitent que très succinctement les différentes zones érosives, sans classification précise ni hiérarchisation des risques.

Les cartes des « risques » d'érosion

Les cartes des « risques » d'érosion reposent sur la prévision des aléas à partir des connaissances actuelles des phénomènes et sont fondées sur des modèles mécanistes ou empiriques. Elles peuvent être menées à différentes échelles : régionale, nationale, internationale.

➤ Etudes régionales

Nord-Pas-de-Calais (King et al., 1991) et Midi-Pyrénées (Collectif, 1993) : ces études apportent des connaissances précises à l'échelle locale ou régionale, mais la qualité des données utilisées, les techniques de modélisation ou d'acquisition de données et les différentes méthodologies adoptées ne permettent pas d'effectuer des comparaisons inter-régionales, ni de généraliser ces travaux à l'ensemble des régions françaises.

Haute-Normandie (Souadi et al., 2000) : un modèle mis au point à l'échelle nationale, a ensuite été adapté pour refléter les particularités de cette région. La méthodologie de cette étude qui peut être appliquée à l'ensemble des régions françaises est détaillée dans la présente étude.

➤ Etudes nationales

Carte de Pihan (1979) : elle ne concerne que le facteur climatique et évalue l'érosivité des pluies en France par calcul mensuel de l'indice R (érosivité de la pluie) de Wischmeier. L'information est ponctuelle, pour 15 stations météorologiques.

Carte des aléas d'érosion (Cadeville et Vogt in «Atlas de la France, milieux et ressources », 1995) : obtenue par combinaison d'indices de pentes, de granulométrie et d'érosivité des pluies, cette carte basée sur une maille de 10 km est d'un rendu peu satisfaisant. L'aléa ne tenant pas compte de l'occupation des sols, des aléas forts apparaissent sur des grandes parties du territoire non affectées par l'érosion. De plus le résultat semble affecté par de nombreux artefacts.

En dehors des études cartographiques, des travaux de synthèse à l'échelle nationale peuvent aussi être mentionnés :

Auzet, 1987 : cette synthèse met en évidence l'importance des problèmes dans les zones de grande culture : érosion diffuse* et érosion de talweg par concentration* du ruissellement

produit par de vastes impluviums imperméabilisés par la battance* et le tassement des sols, érosion en rigoles sur des coteaux en culture de printemps.

Litzler, 1988 : une synthèse sur l'érosion de vignoble.

Tous ces travaux ont eu pour intérêt de permettre de dégager une typologie des processus, et l'on est maintenant en mesure de hiérarchiser les facteurs à l'origine de l'érosion dans les différents types de situations.

➤ **Etudes européennes des autres pays européens**

Parmi les études remarquables menées par les autres pays européens ou par des institutions européennes, on peut citer notamment (liste non exhaustive - voir bibliographie) :

- Icona (1988) en Espagne, Graziani (1988) en Italie, Biagi (1986) en Europe, Briggs & al. (1989) pour l'Europe méditerranéenne.
- CORINE-Erosion (Collectif, 1992) : cette étude qui concerne le sud de la France, l'Italie, l'Espagne, et la Grèce, a été réalisée pour la Communauté Européenne et a permis de mettre au point une méthodologie assez élaborée pour cartographier l'aléa érosif combinant des données pédologiques, météorologiques, topographiques et d'occupation des sols. L'espace cartographié pour la France se limite géographiquement au sud d'une ligne Bordeaux- Grenoble. Cependant, pour la France, la carte finale des aléas d'érosion n'évalue qu'à 1% la part des surfaces concernées par des risques forts et à 12% les surfaces en risques moyens. Elle fait ressortir des risques moyens sur le rebord Sud-Est du Massif Central et la région niçoise, mais aucun risque n'apparaît dans le piémont Pyrénéen ou dans la zone méditerranéenne, alors que ces régions sont fortement concernées par l'érosion des sols. Les résultats de cette étude présentent des limites, évoquées par les auteurs eux-mêmes, qui peuvent s'expliquer par le faible poids donné à l'agriculture, mais surtout par la faible précision des données utilisées à cette échelle :
 - le MNA (Modèle Numérique d'Altitude- dit aussi MNT ou Modèle Numérique de Terrain) au pas de 1 km ne permet pas de caractériser les reliefs de faible amplitude ;
 - les données sur l'occupation des sols sont assez frustrées et ne comporte que deux classes : « entièrement couverts » ou « partiellement couverts » ;
 - les données météorologiques moyennes mensuelles sont intégrées par l'index de Fournier et un index d'aridité, qui ne permettent pas de prendre en compte l'érosion sous faibles pluies et sur sols sensibles à la formation d'une croûte de battance.
- Plus récemment, Van de Kniff et al. (1999) ont appliqué le modèle de Wischmeier en Italie et pour l'Europe entière. L'application du modèle fait essentiellement ressortir les zones de montagne comme zones à risques et la cartographie n'apparaît pas très adaptée pour évaluer les risques des zones cultivées.

1.2 Les objectifs de l'étude

La Cartographie de l'aléa érosion des sols en France, établie à partir de la modélisation des phénomènes érosifs et éditée par l'Ifen en 1998, sert de point de départ à cette synthèse. Elle peut aujourd'hui être réactualisée grâce à plusieurs travaux récents :

- L'application du modèle à l'échelle régionale, qui a permis d'affiner certaines règles de décision par la confrontation avec des données de terrain ;
- L'application du modèle à l'échelle européenne, qui a permis d'améliorer la prise en compte de l'érodibilité* du matériau parental, notamment sur pente forte ;
- Les cartes et références en matière de lutte contre l'érosion des sols de « *L'inventaire des coulées de boue en France de 1985 à 1995* » (Collectif, 1996, non publié).

Avertissement

Compte tenu de la dimension et de la variabilité spatiale du territoire traité, **les cartes de l'aléa d'érosion de cette étude ne sont pas destinées à être interprétées localement**, mais plutôt à l'échelle de petites unités spatiales (cantons, petites régions agricoles, etc.). En conséquence leur utilisation lors d'études régionales doit être entourée de précautions et faire l'objet de travaux plus approfondis ou plus spécifiques.

LES PHENOMENES D'EROSION HYDRIQUE

2.1 Définition des processus et des termes utilisés

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité* de la surface du sol (**ruissellement « Hortonien »**), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (**ruissellement par saturation**). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (Cros-Cayot, 1996). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : **l'érosion de versant diffuse** ou en **rigoles parallèles** et l'érosion linéaire ou **concentrée de talweg**.

Comme le suggèrent ces définitions, les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux, et sont de ce fait complexes à modéliser. **Les facteurs de l'érosion** devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier et Smith, 1978 ; King et Le Bissonnais, 1992).

Les paramètres de l'érosion sont les différentes informations qui peuvent permettre de caractériser les facteurs de l'érosion. Par exemple, la pente est un paramètre pouvant caractériser le facteur topographie, de même que le dénivelée, l'altitude moyenne, etc. Des choix sont donc nécessaires pour caractériser chacun des facteurs évoqués. Le plus souvent ces choix résultent d'un compromis entre la connaissance que l'on a des processus, et la disponibilité des différents paramètres. Ainsi, pour caractériser l'influence du climat, l'énergie cinétique cumulée des pluies serait probablement le paramètre le plus pertinent, mais il n'est pas disponible, et on retiendra donc les hauteurs de pluie cumulée, pondérées par une information sur l'intensité des précipitations.

2.2 Typologie des phénomènes érosifs

Le phénomène érosif se déclenche et se développe de différentes manières, selon qu'il affecte des types de cultures ou des espaces géographiques différents. Dans les zones de grandes cultures ou de vignobles, l'érosion ne prendra pas la même forme selon les facteurs (sol, occupation du sol, topographie et climat) prédominants dans la zone géographique concernée.

Par conséquent, on peut distinguer 4 grands types érosif en fonction de leurs principaux facteurs déclenchant l'érosion, classés par ordre d'importance.

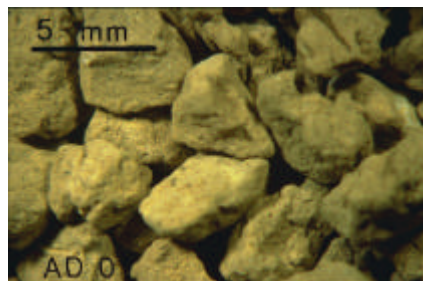
Type 1 : érosion en régions de grandes cultures

- Type 1.a : érosion automnale et hivernale par concentration du ruissellement.

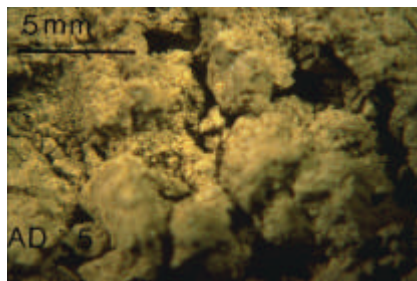
Les sols limoneux, particulièrement les plus pauvres en argile et en matière organique, sont très sensibles à la battance. Les gouttes d'une pluie de forte intensité qui ne sont pas interceptées par le couvert végétal entraînent le rejaillissement de particules fines (effet splash) et l'éclatement des mottes par réhumectation. Les mottes « fondent » et la surface se colmate (photographies 2a, 2b, 2c). **La croûte de battance** ainsi formée s'épaissit dans les petites dépressions où l'eau stagne, permettant la sédimentation des éléments fins. La perméabilité de la surface peut descendre en dessous de 2 mm/h en période humide. Le micro relief s'estompe et le sol perd toute capacité de rétention d'eau

superficielle*. Lorsque la croûte de battance est formée, les pluies ultérieures, même si elles sont de faible intensité, engendreront du ruissellement.

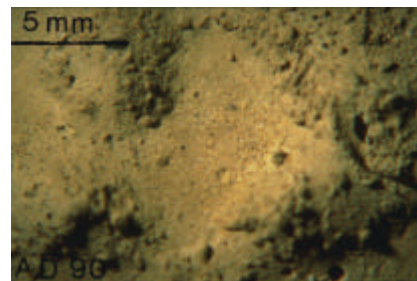
Photographies 1a 2b 2c : Evolution des états de surface d'un sol limoneux : formation d'une croûte de battance ; Y. Le Bissonnais.



2a - stade 1 : agrégats visibles



2b - stade 2 : mottes dégradées



2c - stade 3 : croûtes de battance formées

La **disjonction spatiale** qui peut exister entre les zones qui émettent le ruissellement (les parcelles battues) et celles incisées plus en aval fait que l'analyse du problème doit se faire au niveau de bassins versants élémentaires et non pas seulement à celui de parcelles agricoles.

Ainsi, dans le Nord et l'Ouest de la France, les **cultures d'hiver**, semées tardivement (en septembre-novembre) ou dans des conditions limites pour l'implantation, constituent les principales cultures à risques en période hivernale, dans le cadre de ce système érosif. En effet, dans ce cas, une couverture végétale protectrice ne s'établit qu'en mars-avril, après l'installation d'une croûte de battance dès la fin novembre, et il n'y a guère de remède efficace pour empêcher la production du ruissellement.

Pour les **chantiers de récolte** tassés par les passages répétés des engins agricoles et pour les **inter-cultures longues**, le ruissellement produit peut aussi être important, mais il est largement fonction du mode de conduite adopté par l'agriculteur (implantation d'un engrais vert, sol décompacté...).

Ainsi, sur des terrains nus ou peu couverts imperméabilisés par une croûte de battance, une pluie, même faible, déclenche un ruissellement important. Ce ruissellement entraîne une érosion diffuse (Le Bissonnais et al., 1996). Il peut se concentrer dans les talwegs et acquérir localement des valeurs critiques de débit, entraînant la formation de ravines (Ludwig, 1993 ; Souchère, 1995).

Les ravines, jouent un rôle majeur dans l'incidence des dégâts, et surviennent soit en limite de parcelles (photographie 3a) soit au sein des parcelles (photographie 3b).



Photographie 3a : « coulée boueuse » en limite de parcelle ; Y. Le Bissonnais.



Photographie 3b : « coulée boueuse » au sein d'une parcelle ; Y. Le Bissonnais.

Type 1.a : facteurs déclenchant de l'érosion par ordre d'importance croissante :

- *La sensibilité à battance (sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance) : sur des sols battus, le ruissellement peut survenir même sur des pentes faibles (inférieures à 5%) et lors de précipitations peu élevées ;*
- *L'occupation des sols : l'absence de protection par un couvert végétal significatif en automne et en hiver. Les chantiers de récoltes, les cultures d'hiver et les inter-cultures nues sont favorables au ruissellement (Gallien et al., 1995 ; Martin, 1996).*

- Type 1b : érosion lors des orages de printemps et d'été.

Lors des orages de printemps et d'été, l'érosion affecte les sols non ou peu couverts par la végétation et affaiblis pour le lit de semence des cultures de printemps. Les particules de terre sont facilement arrachées et entraînées par les pluies de forte intensité (photographie 4).



Photographie 4 : formation de ravines sur un lit de semence, après un orage de printemps ; Y. Le Bissonnais.

Dans ces conditions, la **forte érodibilité** et la cohésion du sol sont des critères d'aggravation qui conditionnent la sensibilité au détachement sous l'action des pluies. Les terrains les plus sensibles sont les parcelles fortement ameublées, ainsi que les sols à faible teneur en argile, teneur que l'on apprécie en général à partir de la texture du sol.

Des écoulements boueux peuvent survenir à l'aval d'un bassin versant même petit et parfois même à l'aval d'une seule parcelle ; il sera en général localisé, comme la pluie orageuse qui l'engendre.

Type 1.b : facteurs déclenchant de l'érosion par ordre d'importance croissante :

- *L'occupation des sols : absence de protection par un couvert végétal lors des orages de printemps et du début de l'été (cultures de printemps) ;*
- *Les précipitations : de fortes intensités au printemps ;*
- *La sensibilité à la battance, si les sols n'ont pas été retravaillés ;*
- *La pente si les sols ne sont pas battus.*

- Type 1.c : succession des types 1.a et 1.b

Ce type s'observera plus particulièrement dans le nord de la France , **types 1.a et 1.b se succédant dans le temps**. En hiver le type 1.a concernera surtout les cultures dites « d'hiver » et, en l'absence de précautions, les inter-cultures. Au printemps, par contre, le type 1.b dominera, les orages posant surtout des problèmes dans les cultures récemment installées.

La présence lors d'un orage de printemps d'un réseau de rigoles (photographie 5) incisées au cours de l'hiver peut augmenter la gravité des « coulées boueuses », en favorisant une évacuation rapide de l'eau et des sédiments.

Type 1.c : facteurs déclenchant de l'érosion

- *combinaison et succession dans le temps des facteurs déclenchants des types 1.a et 1.b*



Photographie 5 : réseau de rigoles creusées en hiver ;
Y. Le Bissonnais.

Type 2 : érosion de vignobles et de vergers

On peut distinguer deux principaux types de gestion des inter-rangs qui correspondent à deux types de fonctionnement de l'érosion différents, ainsi que la combinaison de ces deux systèmes :

- Type 2.a : érosion dans les vignobles par concentration de ruissellement

Lorsque les parcelles sont conduites en **non culture**, c'est-à-dire avec un entretien chimique du sol, celui-ci se tasse progressivement sous les passages successifs des roues, ce qui provoque une imperméabilité croissante. Localement, des phénomènes de battance peuvent jouer un certain rôle (ex. sols limoneux du Biterrois, dans le vignoble languedocien).

Sur ces surfaces tassées, le ruissellement se déclenche pour des pluies d'assez faible intensité. L'eau acquiert ensuite une vitesse suffisante pour creuser rigoles et ravines. Cette incision est encore favorisée par la destruction de la végétation herbacée en bas de parcelle et dans les talwegs, destruction liée à l'entraînement d'herbicides utilisés pour maîtriser les mauvaises herbes. Les incisions ne sont pas effacées puisque le sol n'est pas travaillé ; elles facilitent ultérieurement la concentration du ruissellement. La résistance du sol au détachement et à l'incision est relativement élevée du fait du tassement du sol. Des écoulements boueux catastrophiques peuvent alors survenir à l'aval de ravines qui produisent le gros de la terre transportée.

- 2.b : érosion dans les vignobles par décapage d'un sol ameubli.

Dans ce système érosif, l'érosion concerne surtout les parcelles dans lesquelles le contrôle des adventices est réalisé par **entretien mécanique** (plusieurs labours au printemps - début été), ou bien celles où la vigne est buttée pour lutter contre les gelées d'hiver puis débarrassée au printemps.

L'intensité de l'érosion est ici liée à la forte érodibilité du sol régulièrement ameubli. Le seuil d'intensité de la pluie au-delà duquel le ruissellement se déclenche est relativement élevé, car l'ameublissement du sol favorise le maintien d'une bonne infiltrabilité. Par contre, sous une **pluie de très forte intensité**, le ruissellement entraîne facilement le sol ameubli et provoque des écoulements

boueux catastrophiques plus en aval. L'érosion est aggravée par la pente, souvent importante dans les vignobles de coteau (15 à 20%).

Types 2.a et 2.b : facteurs déclenchant de l'érosion par ordre d'importance croissante :

- *L'occupation des sol : la taille des parcelles et leur localisation dans le paysage agricole ont une grande importance mais ne peuvent pas être prises en compte ici, de même que les aménagements anti-érosifs ;*
- *Les pentes et la sensibilité à la battance : pentes fortes pour une battance moyenne et pentes faibles pour une battance forte.*

- Type 2.c : Succession des deux systèmes érosifs sur un même coteau.

Les deux types d'érosion de vignoble peuvent se succéder en se **juxtaposant dans l'espace**, en fonction du mode de conduite des parcelles. En effet, les deux pratiques d'entretien du sol coexistent souvent dans un même secteur.

Par rapport aux risques érosifs, leurs combinaisons le long d'un même versant sont plus ou moins heureuses :

- lorsque la parcelle tassée (émettrice de ruissellement) est située en amont et la parcelle ameublie en aval, les risques sont augmentés ;
- inversement, lorsque la parcelle ameublie est située en amont, elle retarde l'apparition du ruissellement, et le sol de la parcelle tassée en aval a une bonne résistance à l'incision. Cette combinaison réduit les risques d'apparition d'écoulements boueux.

Type 3 : érosion de montagne

- Du fait de la spécificité des processus et de l'absence d'emprise agricole dans cette zone, la haute montagne (altitude moyenne des communes supérieure à 1 200 m) ne sera pas traitée et sera matérialisée par un masque opaque superposé à la cartographie des aléas.
- Pour la zone de montagne (altitude moyenne des communes supérieure à 700 m ou pente moyenne supérieure à 20%), l'aléa érosif représenté correspondra à l'aléa sur les terrains agricoles en montagne. Cet aléa est lié notamment à l'instabilité des matériaux parentaux, et peut être du ravinement ou des glissements de terrains dans les zones agricoles. Les autres phénomènes typiquement montagnards tels que la solifluxion, les glissements de terrains de grande ampleur ou les laves torrentielles ne sont pas évalués par cette étude, dont l'objet principal est l'étude des phénomènes d'origine agricole.

Type 3 : facteurs déclenchant de l'érosion :

- *la pente, souvent supérieures à 30% ;*
- *l'intensité des précipitations, généralement élevées en toutes saisons ;*
- *l'érodibilité des terrains : les matériaux parentaux instables peuvent être le siège de mouvements de terrains ou de ravinements importants.*

Type 4 : érosion méditerranéenne

La spécificité de l'érosion méditerranéenne tient surtout à son climat contrasté. En début d'été, des orages violents se succèdent et saturent rapidement le sol, pouvant provoquer des rigoles plus ou

moins profondes et entraînant de grandes quantités de terres sur les espaces dégradés. En automne, des orages surviennent après une longue période sans pluie, sur des sols desséchés ayant subi la dessiccation estivale.

Ainsi, des pluies de très forte intensité mais souvent localisées, peuvent provoquer des dégâts importants sur tous les types de cultures. Les dégâts sont d'autant plus importants que les sols de la région sont souvent minces et pauvres en matière organique.

Outre les types érosifs cités ci-avant, on trouve les figures d'érosion typique de la zone méditerranéenne présentes dans le sud-est de la France, mais aussi et surtout en Espagne, en Italie ou en Grèce. On peut citer :

- **Les badlands**, où l'érosion sur pentes fortes creuse de profonds et nombreux ravins (photographie 6).
- **L'érosion d'anciennes terrasses** abandonnées, s'écroulant faute d'entretien (photographie 7)
- **L'érosion de vignoble** sur sols fortement pierreux (photographie 8).
- **L'érosion des zones récemment incendiées**, sans protection végétale sur des terrains souvent pentus, couvrant de vastes étendues (photographie 9).



Photographie 6 : érosion des badlands, formations marneuses du Sud-est de la France ; C. Bardet.



Photographie 7 : érosion d'anciennes terrasses de culture (Sud-est de la France) ; C. Bardet.



Photographie 8 : formation de ravines dans un sol fortement pierreux du Sud-est de la France ; C. Bardet.



Photographie 9 : érosion dans une zone incendiée du Sud de la France ; C. Bardet.

En plus de ces figures érosives spécifiques, on retrouve bien entendu dans la zone méditerranéenne tous les autres types précédemment décrits.

LES CONSEQUENCES OBSERVEES DE L'EROSION – INVENTAIRE DES « COULEES BOUEUSES »

Les 4 grands types érosifs présentés ci-dessus sont à l'origine de problèmes multiples au sein des bassins versants : à l'amont, les dégâts provoqués dans les parcelles concernent directement les agriculteurs et à l'aval, les dégâts liés aux « coulées boueuses » sont supportés par les agriculteurs mais également par d'autres populations.

3.1 Les conséquences à l'amont et à l'aval des bassins versants

A l'amont : les dégâts concernant directement les agriculteurs

Dans les parcelles cultivées, certains dégâts sont particulièrement visibles, sinon spectaculaires. Lorsqu'ils deviennent fréquents, ils incitent l'agriculteur à rechercher des solutions et facilitent ainsi sa mobilisation pour des actions globales visant la maîtrise de l'érosion des sols.

Parmi les dégâts aux cultures, on observe la **destruction des semis dans la zone de décapage**. Les rigoles et les ravines incisées par le ruissellement entraînent le **déchaussement et l'arrachement des plants**. Sur les replats, souvent en bas de parcelle, le dépôt de la terre entraînée provoque **l'ensevelissement des semis** ou des jeunes plants noyés sous la boue.

Les ravines, même en dehors de leurs périodes d'activité, constituent une gêne pour le **passage des engins agricoles**. Lorsque les ravines sont trop profondes pour être franchies, les agriculteurs doivent travailler leurs parcelles morceau par morceau, ce qui augmente le temps de travail et les coûts de production.

D'autres types de dégâts sont plus insidieux car moins visibles et conduisent à une **perte de capital sol**. L'importance de l'érosion peut-être localement quantifiée en tonnes de sol (ou de terre) perdues par hectare et par an. On considère généralement que des valeurs de plus de quelques tonnes par hectare et par an correspondent à un phénomène préoccupant.

Les conséquences de ces pertes sont variables : une tonne de sol érodée constitue une menace beaucoup plus grave pour un sol mince que pour un sol épais. Les distances de transports sont aussi très variables, les sédiments pouvant se redéposer à proximité de leur point d'arrachage ou être acheminés sur de longues distances jusqu'aux cours d'eau.

L'impact de la perte de sol sur la fertilité varie selon la profondeur du sol. Ainsi, sur un sol très épais, l'impact du décapage passera longtemps inaperçu. Les conséquences de l'érosion en termes de perte de fertilité varient aussi selon le caractère plus ou moins meuble de la roche-mère ; sur les plateaux limoneux du Nord et de l'Ouest, le décapage par l'érosion en nappe d'une certaine épaisseur de sol se traduit surtout par une « dilution » de la matière organique, du fait du labour qui remonte en surface une nouvelle tranche de limon. L'effet agronomique de cette perte de sol est faible, tant que l'érosion ne met pas à nu les calcaires situés sous la couche de dépôts limoneux. Par contre, un décapage similaire peut entraîner une perte de fertilité définitive lorsque la vitesse de pédogenèse est très lente, par exemple s'il s'agit d'un sol peu épais sur une roche-mère de calcaire. Souvent, cette érosion insidieuse reste inaperçue et donc peu mobilisatrice en régions de grandes cultures. Dans les vignobles de coteau, où la notion de terroir est primordiale, les viticulteurs ont par contre coutume de remonter la terre sur les pentes pour pallier aux pertes.

L'amincissement du sol conduit à une diminution de sa fertilité d'autant plus marquée que l'érosion est sélective : la terre fine exportée est riche en éléments fertilisants et en matière organique.

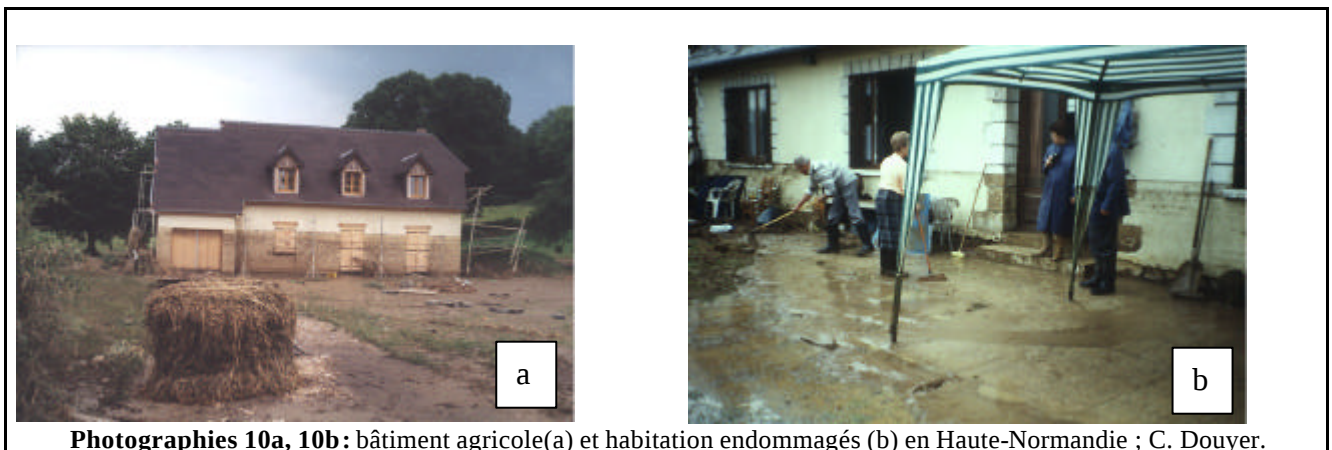
Le décapage du sol est aussi à l'origine de la **diminution de la réserve utile en eau**, d'autant plus importante pour les cultures dans les régions où les sols sont peu épais et les précipitations contrastées (périodes sèches), comme dans la zone méditerranéenne.

Les déplacements de matière liés au ruissellement conduisent à une **hétérogénéisation des parcelles**. Nous observons une ablation sélective des éléments fins et des matières organiques en haut de parcelle et à leur entraînement vers l'aval. Les produits de traitements et les engrais encore disponibles en surface lors de la pluie sont également entraînés par le ruissellement et peuvent provoquer des dégâts dans le bas de la même parcelle ou dans celles situées plus loin (surdosage en engrais, phytotoxicité).

A l'aval : les conséquences pour les installations humaines

Les dégâts à l'aval peuvent être de trois types :

- Les **écoulements boueux catastrophiques**, qui se concentrent dans les bassins agricoles, dévalent le long du réseau de vallées et de vallons secs et provoquent des dégâts à l'encontre **des bâtiments** (photographie 10 a et b), **des ouvrages d'art et des routes** (photographie 11).



Photographies 10a, 10b : bâtiment agricole(a) et habitation endommagés (b) en Haute-Normandie ; C. Douyer.



Photographie 11 : dégâts occasionnés à une route en Haute-Normandie ; C. Douyer.

Les écoulements boueux catastrophiques sont déclenchés par des précipitations exceptionnelles et peuvent entraîner des dégâts matériels importants, indemnisables sous certaines conditions, au titre des catastrophes naturelles. Ces « coulées boueuses » sont différentes des inondations provoquées par la crue d'un cours d'eau lorsqu'il envahit son lit majeur, ou par le débordement d'une nappe phréatique. Ces phénomènes surviennent toutefois souvent conjointement. Compte tenu de cette définition, **l'érosion hydrique des sols cultivés joue un rôle central** dans leur déclenchement.

- **Dans les paysages de grandes cultures**, caractérisés par l'importance des vallées sèches, le ruissellement émis lors des longues périodes de pluies hivernales par les surfaces imperméabilisées par une croûte de battance est acheminé rapidement vers le réseau hydrographique superficiel et participe à la **formation des crues**.
- **En dehors des catastrophes naturelles liées à des pluies exceptionnelles**, l'érosion chronique provoque aussi des dégâts moins spectaculaires, en particulier sur les routes. La terre exportée des parcelles par le ruissellement **se dépose sur la chaussée et comble les réseaux de collecte des eaux**, ce qui nécessite des interventions pour leur remise en état. Les ravines creusées en bordure de voirie provoquent le **sapement des chaussées**.

A l'échelle régionale : la pollution de l'eau

La perte en sol est un facteur de pollution des eaux superficielles. Les eaux de ruissellement sont chargées en matières en suspension qui sont des vecteurs d'éléments chimiques (fertilisants tels le phosphore, adsorbé sur les particules de terre, produits phytosanitaires, etc.) et augmentent la **turbidité des cours d'eau** ainsi que leur teneur en **éléments eutrophisants** (phosphore).

Ces polluants dégradent la qualité des eaux superficielles utilisées pour l'alimentation en eau potable, ce qui peut ensuite se répercuter sur le prix de l'eau, ou entraîner provisoirement l'interruption de la distribution d'eau potable.

Quand les eaux ruisselées peuvent s'infiltrer rapidement par des voies préférentielles (cas des bétouilles ou dolines en milieu karstique), elles participent directement à la **dégradation de la qualité des eaux souterraines**.

La dégradation de la qualité des eaux liée à l'entraînement de particules du sol conduit à investir dans des ouvrages de traitement pour maintenir la qualité de l'eau potable, ainsi que dans la création de réseaux d'adduction pour alimenter ces ouvrages, les unités créées devant être de grande taille.

Les fortes turbidités sont aussi à l'origine d'une dégradation de la **qualité biologique** du milieu aquatique par :

- réduction de la pénétration de la lumière dans l'eau et donc diminution de l'activité photosynthétique ;
- envasement du lit modifiant les équilibres écologiques ;
- perturbation de la faune piscicole pouvant entraîner des mortalités importantes des poissons autochtones ;
- apports d'éléments nutritifs pouvant favoriser l'eutrophisation ;
- apport d'éléments polluants.

La gravité de cette pollution des eaux est due à la fois à son caractère chronique et à des épisodes érosifs exceptionnels induits par des pluies de faible fréquence de retour.

Du fait de cet apport aux rivières et de leur envasement, les syndicats de rivière sont obligés de réaliser des curages fréquents et coûteux. Cependant, une fraction des matériaux arrachés par l'érosion dans une parcelle se dépose avant d'atteindre un cours d'eau, lorsque la diminution de la pente et le couvert végétal (herbe, haie, etc.) favorisent le ralentissement et l'infiltration du ruissellement. L'existence de haies ou de talus ainsi que la diversité des états de surface jouent un rôle important dans ce piégeage.

3.2 L'inventaire et la cartographie des « coulées de boue »

Introduction

Les paragraphes précédents ont présenté les manifestations connues de l'érosion hydrique et les conséquences encourues au sein des parcelles agricoles ou des zones urbanisées. Cependant, pour connaître la **répartition spatiale** des phénomènes et surtout pour **quantifier** les conséquences de l'érosion en France (nombre de personnes touchées, montant estimé des dégâts), il n'existe pour seule source d'information disponible, qu'un recensement des catastrophes naturelles donnant lieu à des demandes d'indemnisation pour les dégâts subis.

Constitution des dossiers « cat. nat. »

Les particuliers victimes d'un sinistre seront indemnisés si l'état de « catastrophe naturelle » est reconnu par une Commission interministérielle composée de représentants des ministères de l'Intérieur, du Budget, de l'Environnement et du Secrétaire d'Etat auprès du Ministre de l'Économie. Pour que la Commission Interministérielle puisse reconnaître l'état de « catastrophe naturelle », les préfets préparent des dossiers « cat.nat. » (catastrophe naturelle) contenant un rapport du maire, une description de l'événement et des dégâts, un rapport météorologique et éventuellement des documents annexes (photos, presse, etc.). Pour les « coulées boueuses », l'état de « catastrophe naturelle » n'est prononcé que si la fréquence de retour des pluies est au minimum décennale.

Les « coulées boueuses » font partie explicitement des catastrophes naturelles dont les conséquences sont susceptibles d'être indemnisées.

Aspects juridiques

La loi de juillet 1982 oblige les particuliers à s'assurer contre les risques naturels, en ajoutant une prime à leur contrat d'assurance (prime de cotisation additionnelle individualisée de 9% du contrat d'assurance). La Caisse Centrale de Réassurance est habilitée à réassurer les sociétés d'assurance pour les dégâts des catastrophes naturelles, avec la garantie de l'Etat. Les biens indemnifiables sont les biens privés (immeubles et meubles), les véhicules et les pertes d'exploitation. Les dommages doivent être directement liés à la catastrophe naturelle.

Lorsque les aménagements de protection prévus par un document d'urbanisme ou par un Plan de Prévention des Risques n'ont pas été effectués par le particulier exposé à un risque (de coulée boueuse par exemple), les assurances ne sont pas obligées de couvrir les dégâts. La loi du 13 juillet 1982 précise en effet : « Sont considérés comme les effets des catastrophes naturelles les dommages matériels directs ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir les dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises ». Dans les faits, les assurances indemnisent toujours les victimes, bien qu'elles aient la possibilité de faire pression sur les assurés pour leur faire effectuer les travaux nécessaires.

Les particuliers ont droit à une indemnisation, même lorsque la commune n'a pas fait les travaux de protection nécessaires pour limiter les dégâts. Mais lorsque les problèmes deviennent chroniques, ils peuvent faire pression sur le maire pour qu'il réalise les aménagements nécessaires.

Au fil des ans, les dégâts provoqués par les « coulées boueuses » sont devenus plus fréquents et ils sont à présent observés pour des précipitations relativement peu exceptionnelles. Cette évolution, qui a de fortes chances de se poursuivre en l'absence de mesures appropriées, conduit au rejet par la Commission Interministérielle de dossiers pour des pluies qui ne sont pas au moins décennales. De ce fait, les collectivités locales sont de plus en plus souvent conduites à prévoir la délimitation des zones à ne pas urbaniser et la réalisation de travaux de prévention s'ils ne veulent pas faire les frais de dégâts récurrents.

Les dégâts aux biens publics appartenant aux collectivités territoriales ne bénéficient pas de l'indemnisation au titre des catastrophes naturelles et n'apparaissent pas dans les dossiers étudiés. Comme leur remise en état peut peser sur les finances des collectivités, le Comité Interministériel a décidé le 24 janvier 1994 d'étudier la mise en place d'un fond d'indemnisation des collectivités locales.

Constitution de la base de données « coulées boueuses »

Pour réaliser la cartographie des « coulées de boue », une première base de données a été créée pour la période allant de janvier 1985 à juillet 1995. Elle recense les « coulées boueuses » déclarées lors des demandes d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles. Ces données proviennent des dossiers « cat.nat. », détenus par le ministère de l'Intérieur. Ces demandes ont fait l'objet d'une acceptation ou d'un rejet de la part de la Commission interministérielle, en fonction de la période de retour des précipitations en cause.

Cette base de données présente un certain nombre d'incertitudes et d'approximations :

- **Les dossiers «catastrophe naturelle** » comportent une fiche remplie par le maire, qui permet de classer² l'événement et ses conséquences. Cependant, cette classification dépend de l'interprétation que l' élu fait de l'événement, d'où la présence fréquente de dossiers incomplets ou remplis approximativement (plusieurs types d'événements cochés par exemple). En effet, soit le maire a de la difficulté à identifier précisément le phénomène, soit plusieurs phénomènes se combinent durant l'événement pluvieux : écoulements boueux en provenance directe des sols cultivés, effondrements de berge, débordement de lits mineurs,

² Deux Classifications sont à remplir dans les dossiers : celle de l'événement (eau de ruissellement, coulée de boue, éboulement, glissement ou affaissement de terrain, etc.) et celle de l'évaluation du préjudice (particuliers, artisans commerçants ou industriels, infrastructures, cultures).

mouvements de solifluxion dans des versants argileux instables. Afin de limiter les erreurs d'interprétation, les dossiers trop incomplets n'ont pas été saisis.

- **Un premier tri des informations collectées** a permis de sélectionner tous les dossiers relatifs à un événement déclaré comme « coulée de boue ». Ces dossiers ont ensuite été triés en événements douteux et événements certains, selon qu'ils présentaient ou non des incohérences entre le phénomène cité et les dégâts constatés. Pour ce faire, l'ensemble des dossiers communaux relatifs au même événement climatique ainsi que les pièces internes des dossiers communaux ont été examinées simultanément, ce qui a permis de sélectionner les « coulées boueuses » susceptibles d'être mises en rapport avec l'érosion agricole. Lorsque les dossiers ont paru peu clairs, ils ont été saisis dans la base de données comme des cas dits « douteux », par exemple lorsqu'il était impossible de différencier une « coulée de boue » d'une inondation ou d'un ruissellement catastrophique.
- Les dégâts provoqués par des événements climatiques non décennaux ne sont pas pris en compte, ce qui entraîne une sous-estimation des dégâts au niveau national.

Pour la période 1988 à 2001, le fichier a été réactualisée à partir des arrêtés de catastrophes naturelles publiés au journal officiel (http://www.legifrance.gouv.fr/html/frame_jo.html), regroupant uniquement les dossiers acceptés par la Commission (et non plus les dossiers soumis à la Commission). Aujourd'hui, la base CORINTE (COMmunes à RISques Naturels et Technologiques, accessible par le site <http://www.prim.net> du ministère de l'Ecologie et du Développement durable tient à jour la liste des arrêtés de catastrophes naturels. Il est possible d'en extraire la liste des communes ayant été affectées par des « inondations et coulées boueuses ».

Il faut, par conséquent, garder à l'esprit l'hétérogénéité de la base de données actuelle. Cependant, en comparant les résultats cartographiques de la 1^{ère} série avec la nouvelle série de données représentées selon la base des PRA (Petites Régions Agricoles), et en ne considérant que celles « peu à très touchées » par les « coulées boueuses », on peut constater que la représentation géographique n'a pratiquement pas été modifiée : cela permet de conclure à une assez bonne cohérence des données.

Afin de disposer d'une base de données homogène jusqu'en 2001, le travail effectué pour la 1^{ère} série de données (tri manuel des dossiers) devrait être poursuivi. Cependant, le tri manuel demandant beaucoup de temps, la méthode employée ici a présenté l'avantage d'une remise à jour rapide de la base.

Pour la période 1995-2001, il n'est pas fait de différences entre les dossiers déclarant des « coulées boueuses » uniquement, des dossiers déclarant des phénomènes multiples (coulées et inondations ou mouvements de masse, etc.). De plus, les événements « coulées boueuses » ne comportent pas de mentions sur l'importance des dégâts provoqués lors des événements catastrophiques.

La fréquence des « coulées boueuses » constitue un **bon indicateur d'une érosion chronique** importante : l'écoulement boueux catastrophique est la manifestation spectaculaire d'un phénomène qui se produit régulièrement, mais avec une intensité moindre. Cependant, **l'absence de déclaration de « coulées boueuses » ne signifie pas qu'elles n'existent pas** ou ne seraient pas susceptibles de se produire.

En effet, certaines zones sensibles aux « coulées boueuses » ne présentent ni habitations ni biens matériels susceptibles de subir des dégâts. De plus, des travaux de protection peuvent diminuer le risque malgré un aléa toujours présent. La négligence ou la méconnaissance de la procédure « cat. nat. » peuvent conduire à l'absence de déclarations, notamment dans les premières années suivant la mise en place de la procédure. Et enfin, un écoulement boueux qui se produit sans provoquer de dégâts n'est pas recensé en tant que catastrophe naturelle.

Exploitation de la base de données « coulées boueuses »

➤ Distribution des « coulées de boue » par régions

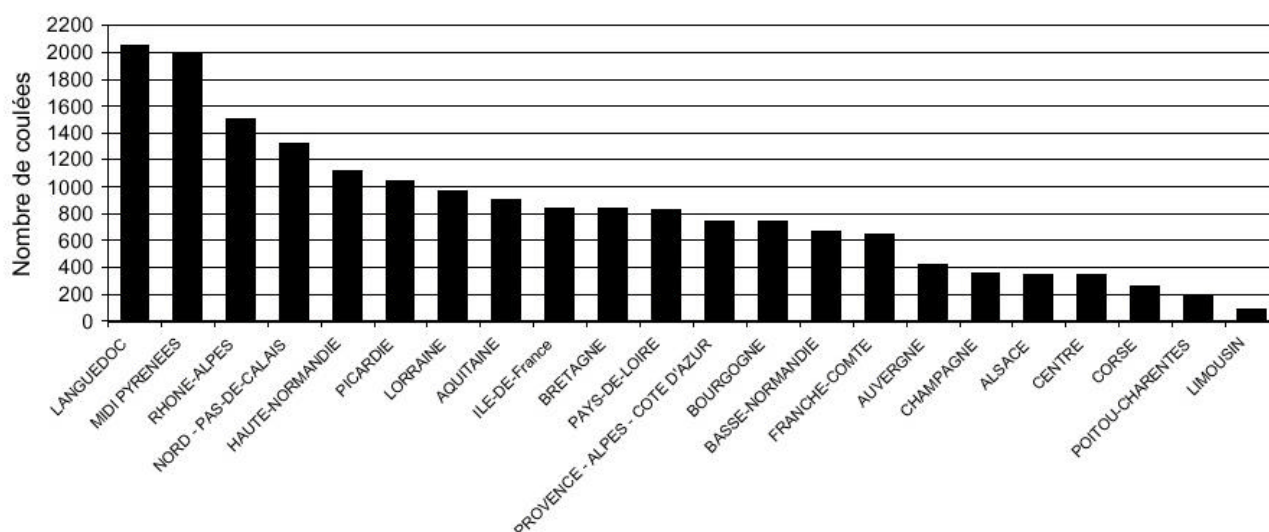


Figure 1 : histogramme du nombre de « coulées de boue » (dossiers de demande d'indemnisation) par région de 1985 à 2001.

Source : base des coulées boueuses.

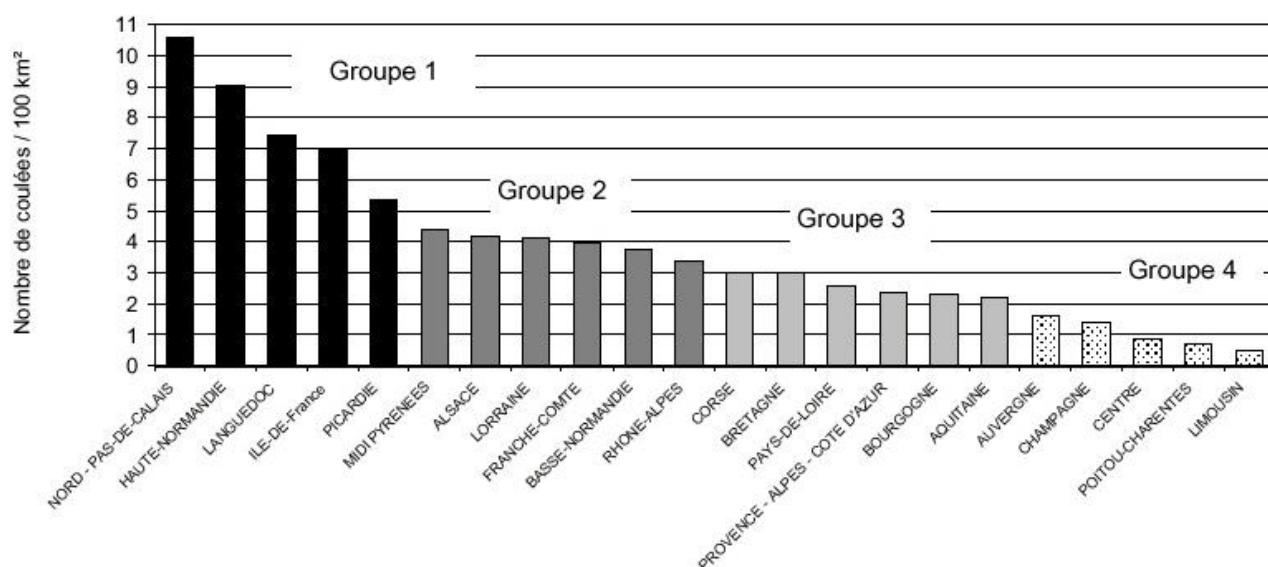


Figure 2 : histogramme des densités de « coulées de boue » (dossiers de demande d'indemnisation) par région de 1985 à 2001.

Source : base des coulées boueuses.

Les histogrammes (figures 1 et 2) permettent de distinguer plusieurs groupes de régions :

- parmi **les régions les plus touchées** (>5 coulées par 100 km²), un premier ensemble est composé du Nord-Pas-de-Calais, en tête, de la Haute-Normandie, de l'Ile-de-France et de la

Picardie. Ces régions adjacentes du nord de la France possèdent des sols sensibles à la battance, largement occupés par des cultures intensives et sont densément peuplées. Le Languedoc-Roussillon est aussi affecté par une forte densité de coulées. Elles sont le fait d'érosion dans les vignobles, qui couvrent une vaste superficie et sont parfois plantés en pentes fortes.

- **Un deuxième ensemble de régions** également très touchées (de 3,4 à 4,4 coulées par 100 km²) est représenté par Midi-Pyrénées, l'Alsace, la Lorraine, la Franche-Comté, la Basse-Normandie et Rhône-Alpes. Ce sont des régions contrastées, soit à relief marqué, soit fortement urbanisées, mais pour lesquelles les facteurs principaux à l'origine des coulées sont probablement divers : vignobles de coteaux pour l'Alsace et une partie de Rhône-Alpes, cultures de printemps sur sols limoneux en Midi-Pyrénées et Basse-Normandie, forte vulnérabilité liée à l'urbanisation en Rhône-Alpes et en Lorraine. La Franche-Comté est quant à elle plutôt concernée par des coulées de boue qui se manifestent conjointement aux inondations, lors de fortes pluies.
- Suit un groupe de **régions intermédiaires** (entre 2,2 et 3 coulées par 100 km²), au sein duquel la Corse et la Bretagne sont les régions les plus touchées.
- Et enfin un groupe de **régions peu touchées** avec l'Auvergne, la Champagne, le Centre, le Poitou et le Limousin, régions herbagères et/ou boisées, ou sans relief marqué.

➤ Distribution des « coulées de boue » dans le temps

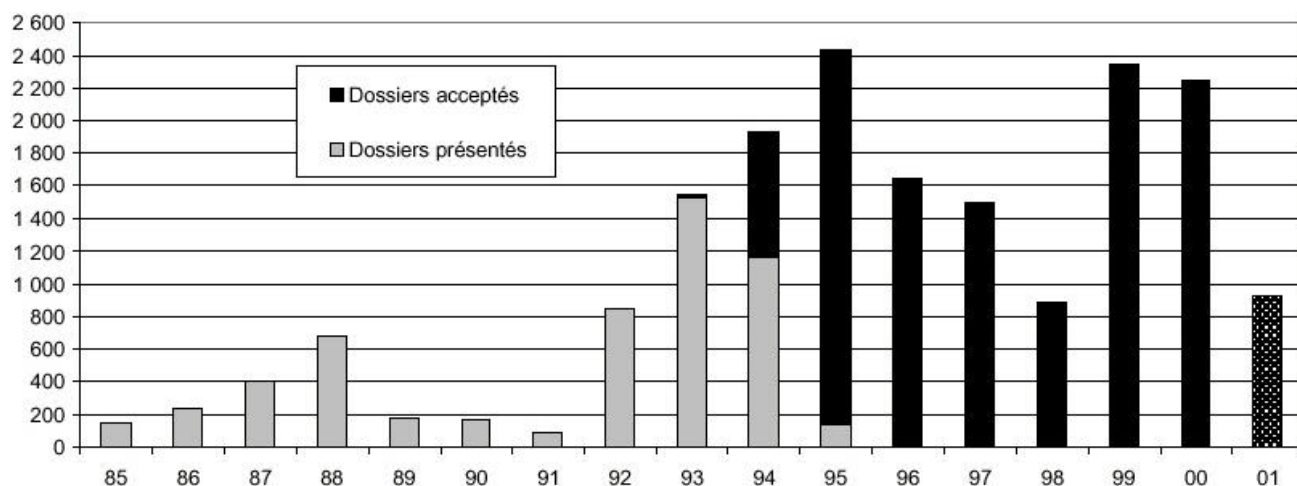


Figure 3 : distribution annuelle des « coulées de boue » (dossiers de demande d'indemnisation) de 1985 à 2001.

Source : base des coulées boueuses.

Remarques :

- l'année 2001 est incomplète (de janvier à avril uniquement).
- afin de prendre en compte la discontinuité des données entre les 2 séries (1985-95 et 95-2001), les données provenant de la 2^{ème} source (dossiers acceptés par la Commission) sont figurées en noir, tandis que celles de la 1^{ère} source (dossiers présentés à la Commission) sont figurées en gris.

Source : base des coulées boueuses.

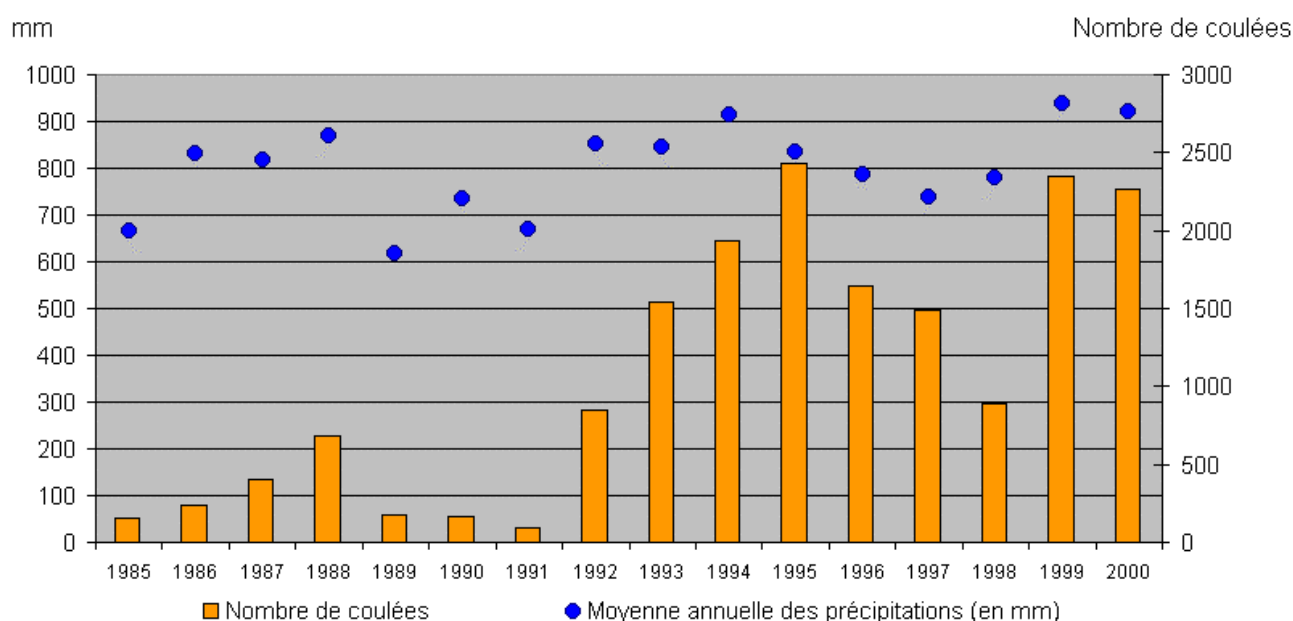


Figure 4 : distribution annuelle des « coulées de boue » (dossier de demande d'indemnisation) , en relation avec les précipitations moyennes annuelles.

Source : base des coulées boueuses, données Météo France.

Les graphiques (figures 3 et 4) de la répartition par année des « coulées de boue » sur 16 ans montre une évolution historique importante, avec un nombre d'indemnisations très élevé depuis 1992. Trois années catastrophiques, 1995, 1999 et 2000 ont été concernées par 2 251 à 2 437 événements, ce qui représente un volume d'indemnisation considérable.

Parmi les années les plus touchées, notons que quelques événements climatiques exceptionnels peuvent provoquer un grande quantité de dégâts. Ces évènements peuvent :

- Soit être à l'origine de nombreuses « coulées boueuses » catastrophiques touchant un grand nombre de communes, comme par exemple l'événement du 5 juillet 1993, qui a concerné 176 communes dans 7 régions (essentiellement Bourgogne, Aquitaine, Midi-Pyrénées, Rhône-Alpes et Auvergne) et a endommagé 1 687 bâtiments au total.
- Soit, pour quelques communes touchées, provoquer un très grand nombre de dégâts, comme par exemple l'événement du 28 octobre 1993, qui n'a touché que 8 communes mais a endommagé 2 014 bâtiments.

Quant aux années 1985 à 1991, elles présentent relativement peu d'événements catastrophiques. Les années 1989, 1990 et 1991 étaient effectivement des années sèches. Par contre, les premières années de mise en place de la procédure « cat nat. » doivent être interprétées avec prudence, les maires n'étant pas forcément bien informés.

Cette répartition annuelle est largement en relation avec les variations de la pluviosité moyenne annuelle pour la France, mais une analyse à partir de données météorologiques plus détaillées serait nécessaire pour établir le poids relatif de la variabilité climatique par rapport à une tendance lourde qui serait liée à l'augmentation du risque.

Par ailleurs, l'augmentation du nombre de demandes d'indemnisation depuis 1992 est à mettre en relation avec l'urbanisation croissante qui induit une vulnérabilité plus importante : toutes choses étant égales par ailleurs, plus un espace sensible est urbanisé, plus les dégâts peuvent y être importants.

➤ **Distribution saisonnière des « coulées de boue »**

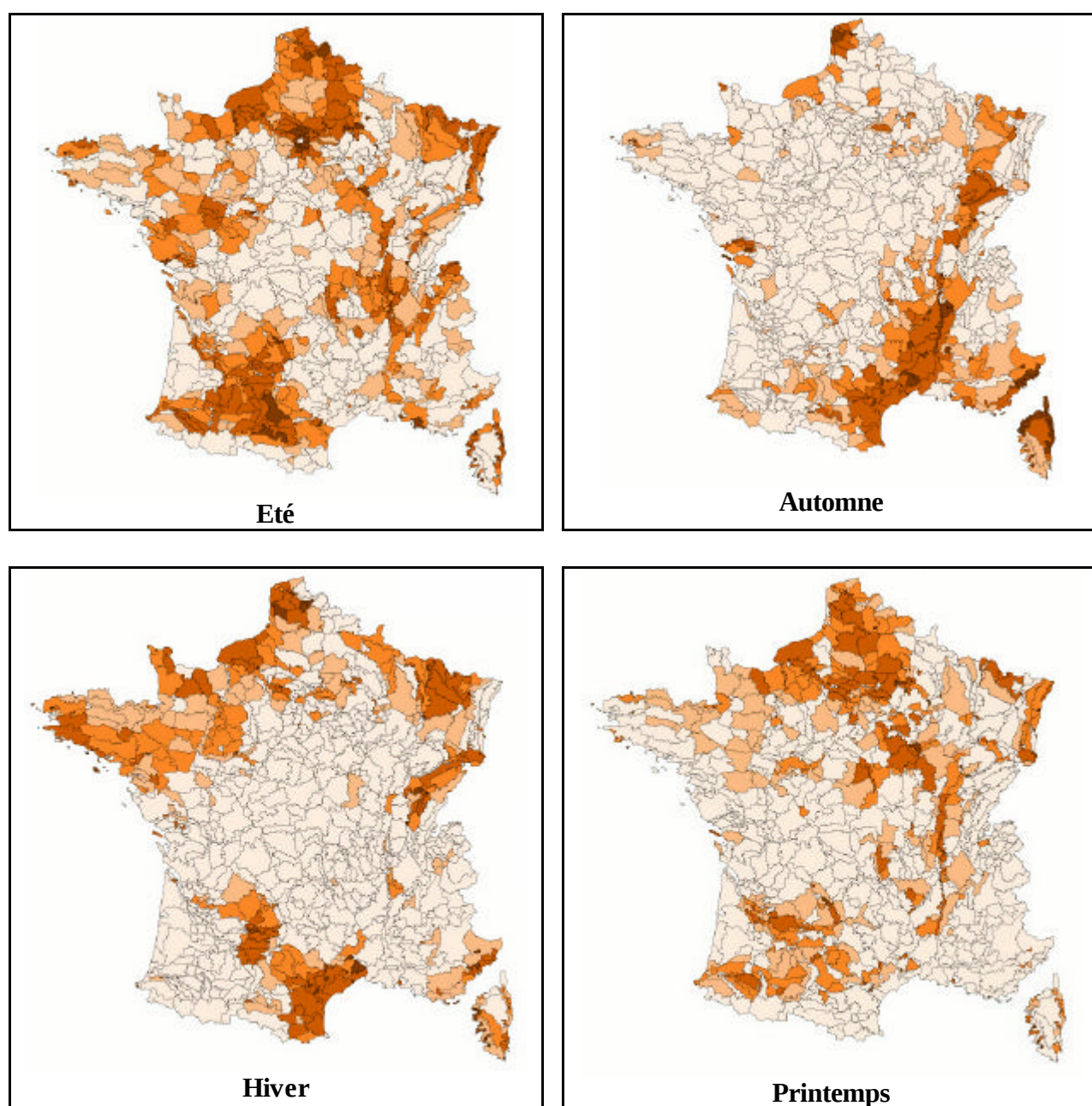


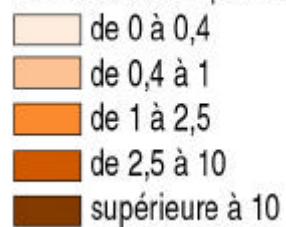
Figure 5 : cartes saisonnières des coulées de boue par petites régions agricoles.

Source : base des coulées boueuses.

Cartographie : INRA Orléans, Kaléidos.



Densité de coulées pour 100 km²



Les cartes saisonnières (figure 5) montrent les deux grands types d'érosion observés dans les régions de grandes cultures à savoir, d'une part l'érosion lors des orages de printemps (mais aussi en été et en automne suivant les cas), et d'autre part l'érosion hivernale par concentration du ruissellement. Il apparaît sur ces cartes que la grande majorité des événements est du premier type, d'autant plus que les événements recensés en automne-hiver dans le sud-est correspondent très certainement à des orages d'automne. Les seules régions largement touchées en hiver sont le Nord-Pas-de-Calais et la Haute-Normandie, mais elles le sont aussi aux autres saisons.

Les dégâts liés aux « coulées de boue »

Les données sur l'importance des dégâts (figures 6 et 7) sont issues des dossiers «catastrophes naturelles» qui décrivent, pour chaque événement catastrophique, les dégâts occasionnés sur la commune afin d'en obtenir le remboursement. Ces données n'ont été collectées que pour la période 1985-1995. Il s'agit, au niveau national, des seules données disponibles : elles sont très incomplètes et ne permettent pas un chiffrage du coût des dégâts liés aux « coulées boueuses ».

Les dégâts sont classés selon les catégories suivantes :

- Dégâts aux particuliers ;
- Dégâts aux artisans ;
- Dégâts aux bâtiments publics ;
- Dégâts aux bâtiments agricoles ;
- Dégâts indéterminés.

Dans la base de données, le nombre de bâtiments touchés est indiqué pour chacune de ces catégories.

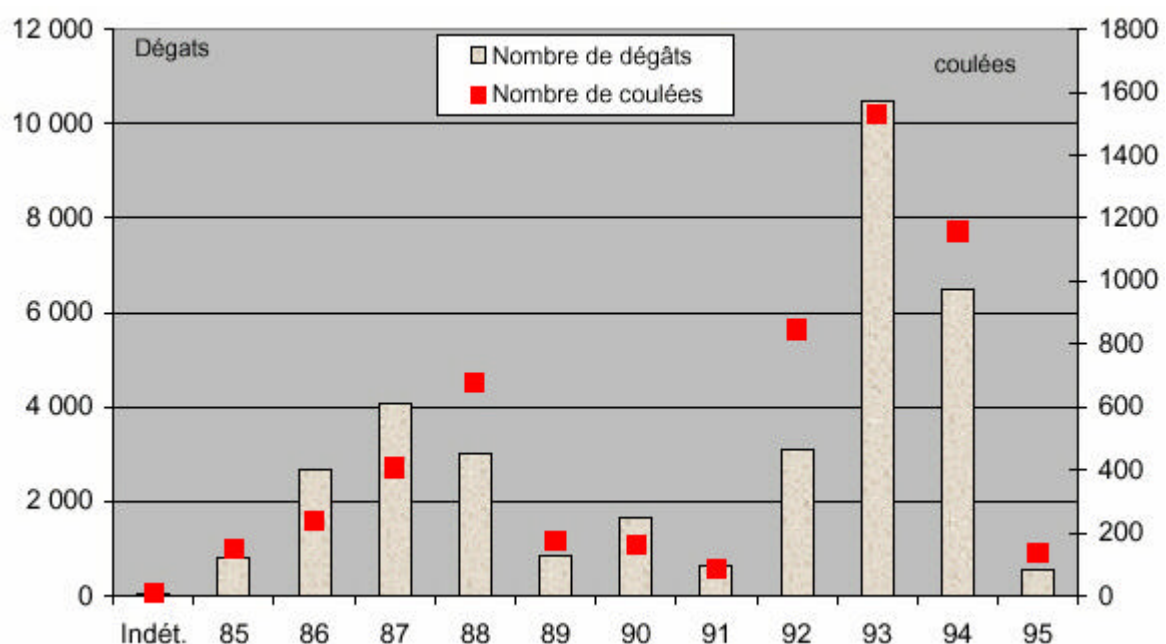


Figure 6 : nombre de dégâts, toutes catégories confondues, et nombre de « coulées boueuses » par années (attention, l'année 1995 s'arrête au 31 juillet).

Source : base des coulées boueuses.

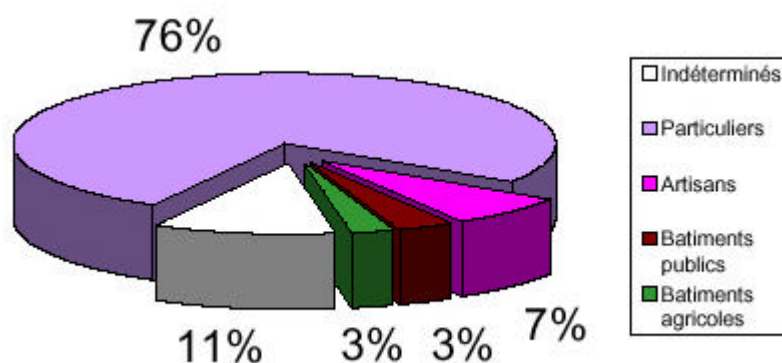


Figure 7 : répartition des dégâts par types de bâtiments touchés.

Source : base des coulées boueuses.

Sur 5 579 évènements catastrophiques recensés en 10 ans et demi, un total de 34 326 bâtiments ont été endommagés, ceci étant un chiffre minimum (du fait de la sous-estimation liée aux dégâts indéterminés). Parmi ceux-ci, on remarque que la majorité (26 112 bâtiments) sont des habitations particulières, situées majoritairement à l'aval des zones émettrices du ruissellement. Mais 860 bâtiments agricoles ont aussi été touchés, bien qu'ils soient en nombre nettement inférieurs.

Ces chiffres, bien qu'ils doivent être considérés comme des ordres de grandeur, indiquent que pour cette période, le montant versé pour indemniser les victimes des « coulées boueuses » est extrêmement élevé.

La circulaire n° 84-90 du 27 mars 1984, relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles dresse le bilan suivant de la loi du 13 Juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles : « **à l'issue de la première année d'application de la loi, le déficit du régime des catastrophes naturelles s'est élevé à près de 2,5 milliards de francs (environ 80 millions d'euros).** Ceci a conduit à porter de 5,5 à 9% le taux de la surprime correspondante ».

Quelques exemples régionaux

➤ Région Ile-de-France

Les collectivités locales supportent la plus grande partie des coûts des « coulées boueuses » qui s'épandent parfois jusqu'aux villages. Les interventions de réparation, de pompage de l'eau et d'évacuation des personnes peuvent peser lourd dans le budget communal.

Par exemple, après les gros orages de juillet 1972 à Mesnil-Aubry (dans le Val d'Oise), pour la remise en état des routes et du réseau d'assainissement, le coût des travaux s'élevait à 7 600 euros en tout, soit 15 euros par habitant. Il en fut de même pour la commune de Fontenay, qui dut déboursier 9 150 euros, soit un peu plus de 13 euros par habitant.

Mais le coût chiffré des dégâts n'est pas représentatif de tous les problèmes engendrés par une catastrophe, notamment de l'impact psychologique sur les populations touchées et de la remise en état individuelle des abords des habitations. La catastrophe n'est en effet pas ressentie de la même façon par ceux qui constatent les dégâts et par ceux qui les vivent. Or, ces comportements peuvent influencer directement le choix des solutions remèdes. Par exemple, la protection rapprochée rassure les riverains, mais ne permet pas d'empêcher les « coulées de boue ».

➤ Région Alsace

D'après une enquête de 1985 (G. Levy, 1985), pour réparer les dégâts de l'érosion dans le vignoble Alsacien, 58% des agriculteurs déclaraient faire venir de la terre et 42% la remontaient depuis le bas des parcelles. 75% d'entre eux considéraient que les chemins étaient un facteur d'augmentation de l'érosion.

D'après le CEMAGREF (1981) et des études de Vogt et Schwing (1979), les volumes de terre remontés dans le haut des pentes après les dégâts de l'érosion peuvent atteindre de 10 m³/ha/an à 100 m³/ha/an. Ces travaux reviendraient alors à 114 euros/ha/an en année normale et 380 euros/ha/an les années de forte pluie.

Un exemple de coût d'un événement catastrophique, d'après l'enquête de 1985 : lors du gros orage du 8 août 1984, une précipitation de 100 à 120 mm en une heure a provoqué l'incision de rigoles et de ravines. Pour 55% des agriculteurs interrogés, les dégâts s'élevaient entre 1 500 et 3 000 euros, et pour 15% à plus de 3 000 euros. Le coût total des dégâts liés à cet orage atteint 10 700 euros/ha si l'on ajoute les dépenses des agriculteurs et celles des communes.

Toujours d'après cette enquête, l'érosion catastrophique est estimée revenir, par ses multiples conséquences, à environ 2 300 euros/ha/an, si l'on ne considère que ce qui est à la charge des exploitants, et à 380 euros/ha/an pour l'érosion courante. Il faut ajouter à cela environ 1 500 euros/an supportés par les communes.

Conclusion sur l'utilisation de la base « coulées boueuses »

La base des « coulées boueuses », malgré les incertitudes évoquées, donne quelques ordre de grandeur des coûts induits par les manifestations de l'érosion des sols en France. C'est actuellement la seule donnée disponible.

Le suivi des « coulées boueuses » par l'analyse des dossiers « cat.nat. » reste essentiel : il permet de se faire une idée de l'impact réel de l'érosion. Sa réactualisation devrait permettre de se faire une idée de l'évolution du phénomène dans le temps et de mettre en évidence, les zones d'aggravation du phénomène, ou nouvellement touchées, notamment à cause de l'urbanisation croissante, ou les zones dans lesquelles, au contraire, le phénomène semble maîtrisé par la mise en place d'aménagements de protection ou de pratiques agricoles adaptées.

3.3 Evolutions récentes des paysages et risques induits

Lorsqu'il est question de « coulées boueuses » et d'érosion des sols, on parle parfois de « **crise érosive** », ce qui sous-entend une aggravation récente des problèmes. Ce terme est à notre avis abusif, car **il n'est actuellement pas possible de savoir si cette « aggravation » est celle du phénomène naturel, ou si elle ne reflète que la perception croissante des dégâts provoqués.**

Si rien ne permet actuellement de dire que l'aléa érosif a augmenté, l'augmentation du **risque** par contre, défini comme le produit de l'aléa par la vulnérabilité, est beaucoup plus probable. Le risque étant fortement corrélé aux transformations induites par l'activité humaine, ces dernières peuvent à la fois favoriser le déclenchement de l'érosion (modifications du paysage agricole et de son fonctionnement hydraulique, à l'origine de la « loi paysage »), et être la cause de l'augmentation de la vulnérabilité (urbanisation dans les zones à risques).

L'unique élément de réponse à cette évolution du **risque** est l'étude du nombre de « coulées boueuses » recensées entre 1985 et 2001. Or, s'il est manifeste que depuis 1993 le nombre de « coulées boueuses » a fortement augmenté, il reste toutefois difficile de mettre en évidence une tendance : s'agit-il d'une « crise » ou d'une aggravation chronique ?

Evolution de l'aléa « coulées boueuses » en régions de grandes cultures.

L'aggravation de l'aléa « coulées boueuses » en région de grandes cultures est le fait de l'évolution du paysage agricole : disparition des éléments structurant le paysage, agrandissement des parcelles, évolution des systèmes de production.

➤ La disparition des éléments structurant le paysage

Ces dernières décennies, la mécanisation a conduit à une restructuration du parcellaire pour créer de grandes parcelles d'un seul tenant. De nombreux éléments structurants qui constituaient une gêne pour la circulation des engins ont disparu du paysage, mais ils jouaient un rôle important par rapport à la circulation de l'eau. Il en résulte une réduction de la capacité de stockage transitoire des eaux en excès provenant des fortes pluies. Cette diminution ne peut que partiellement être compensée par des ouvrages de retenue destinés à assurer la protection rapprochée de zones urbanisées.

- Les **talus**, les **haies** et les **prairies** (photographie 12) occupant des positions stratégiques par rapport au fonctionnement hydraulique du paysage, favorisent la dispersion et l'infiltration du ruissellement concentré et permettent le dépôt des matériaux entraînés. Par ailleurs, les haies et les talus réduisent progressivement la pente des terres situées en amont, ce qui freine également l'érosion des sols. Les haies les plus intéressantes sont celles situées en rupture de pente sur le versant et celles qui accompagnent les talus de ceinture dans les bas-fonds. Les effets sur le ruissellement et sur l'érosion des haies et des talus sont subordonnés à une certaine continuité des réseaux (un élément isolé favorise l'incision de ravines à partir de ses extrémités) ainsi qu'à son entretien (non traités à temps, les terriers et les amorces de ravines favorisent le développement de l'érosion régressive).



Photographie 12 : talus, haies et prairies jouent un rôle essentiel dans la lutte contre les « coulées de boue » : paysage de bocage sur la commune de Chassignolles (Indre) ; S. Salvador-Blanes.

- Les **prairies permanentes** jouent un rôle particulièrement important lorsqu'elles sont situées sur les parties pentues des versants ou en fond de talweg. Elles servent alors de zones d'épandage aux ruissellements chargés de terre et évitent l'incision du fond de talweg.
- Les mares, éléments traditionnels du paysage dans certaines régions de polyculture-élevage, servaient à l'alimentation des animaux. La spécialisation des exploitations, la prophylaxie et l'apparition des citernes entraînent souvent leur disparition, ce qui réduit la capacité du paysage à retenir les eaux brs de pluies exceptionnelles. Pour plus d'information sur les zones humides on pourra se référer au site portail de l'observatoire national des zones humides sur le site internet de l'Ifen (<http://www.ifen.fr>).
- Les fossés permettent l'évacuation sans dégâts des eaux collectées, à condition d'être bien calibrés, de comporter des enrochements pour éviter l'érosion régressive dans les sections à pente forte et d'être correctement entretenus. La disparition des fossés en liaison avec l'agrandissement des parcelles favorise l'érosion par ravinement.

➤ **Agrandissement des parcelles et spécialisation des cultures**

- L'agrandissement des parcelles a pour effets la disparition de structures paysagères décrites plus haut. Il a également des effets spécifiques : plus une parcelle est longue, plus le ruissellement peut se concentrer et acquérir un volume tel qu'il ne peut plus être stocké ou ré-infiltré en bout de champ.
- La réduction du nombre de cultures sur un bassin versant, liée à la spécialisation des exploitations, crée des situations où un groupe de parcelles homogènes attenante porte la même culture, travaillée de façon similaire. Cette « parcelle de culture » est alors équivalente à une grande parcelle. Au niveau d'un bassin versant, cette homogénéisation des états de surface peut se traduire par une érosion plus importante lorsque les états de surface sont propices au ruissellement.

➤ **L'évolution des systèmes de production**

- Le recul des surfaces toujours en herbe : la spécialisation des exploitations et la diminution de l'élevage dans les régions de grandes cultures s'est souvent faite aux dépens des herbages. Or les surfaces en herbe servent de tampon sur un bassin versant, en diminuant la surface produisant du ruissellement et en dispersant celui qu'elles reçoivent (infiltration, décantation). De nombreux auteurs soulignent le fait que la prairie est la couverture végétale protégeant le mieux le sol.
- Le développement de cultures de printemps : d'une façon générale, l'augmentation de la surface des terres labourées accroît le risque érosif lorsqu'elle se fait au détriment des prairies permanentes. Cette évolution est aggravée lorsqu'elle s'accompagne d'un développement des cultures de printemps, surtout dans les zones concernées par les orages à cette période de l'année. Par exemple : la betterave, le lin, la pomme de terre, le pois, le tournesol etc. constituent des « cultures à risque ». Celui-ci est d'autant plus important que le lit de semence doit être affiné. De façon moins systématique, le développement des cultures de printemps peut aussi augmenter les risques à l'automne, lorsque les chantiers de récolte conduisent au tassement du sol sur une surface importante, ou en hiver, lorsque l'inter-culture n'est pas conduite avec un minimum de précautions.

➤ **Les conséquences de l'évolution des pratiques culturales**

L'impact de l'évolution des pratiques agricoles sur le ruissellement est moins systématique et plus varié que l'évolution du paysage précédemment décrite.

- Davantage de terre fine : l'évolution des pratiques culturales entraîne souvent un affinement plus poussé du sol, ce qui facilite l'apparition d'une croûte de battance, et la présence de surfaces plus sensibles au printemps.
- Davantage de sol tassé : la multiplication des interventions culturales (traitements phytosanitaires, apports d'engrais, etc.) augmente la fréquence des passages d'engins sur les parcelles. L'augmentation de la surface de sol tassé accroît le ruissellement, qui se concentre dans les traces de roues. Cependant, l'évolution récente des machines, avec des pneus mieux adaptés aux sols à faible portance et la réduction du nombre de passages grâce à la possibilité de combiner les outils, ont permis de réduire ces dernières années le tassement lié à la préparation des sols.
- La baisse de la teneur en matière organique du sol : la matière organique améliore la stabilité structurale des terres et, de ce fait, freine le développement de croûtes de battance et améliore la résistance au détachement par l'effet splash. Le retournement des prairies permanentes entraîne une forte baisse de la teneur en matière organique du sol, qui passe en quelques années d'une valeur élevée (de l'ordre de 3 à 5%) à une valeur souvent très basse (de l'ordre de 1 à 2%), et qui ensuite reste stable. Par ailleurs, du fait de la régression de la polyculture élevée, le fumier n'est plus incorporé au sol comme auparavant, ce qui conduit aussi à une baisse de la teneur en matière organique du sol. Cependant, dans la plupart des cas, une remontée de la teneur en matière organique du sol susceptible d'avoir un impact significatif sur sa stabilité structurale (en retrouvant des valeurs de l'ordre de celles observées sous une prairie permanente) n'est possible que dans le cadre d'une modification profonde des pratiques agricoles.

Pour résoudre ces problèmes, deux grands types de solutions peuvent être proposés :

- réduire les pertes de matières organiques par minéralisation et provoquer une augmentation relative de leur concentration en surface en réduisant la fréquence et la profondeur de travail du sol (travail superficiel, non labour, semis direct, « conservation tillage »).
- augmenter les apports en matière organique par une amélioration de la gestion des rotations et les résidus de récolte et/ou en recourant à des apports exogènes de matière organique stable (fumier, tourbe, compost, amendements organiques divers).

Les **principales sources de matière organique** pour un sol cultivé sont :

- les matières organiques exogènes, aussi appelées amendements organiques, apportées en complément des restitutions des cultures sur les sols. La principale source de carbone organique exogène stable sont les fumiers dont la production s'élève à plus de 86 millions de tonnes. Mais l'utilisation des fumiers reste souvent locale, autour de l'exploitation elle-même.
- les composts représentent une quantité beaucoup plus faible de matière organique : environ 1 million de tonnes par an pour toute la France. réparties de la façon suivante (ADEME, 1999, 2000) : compost de déchets verts (240 000 tonnes/an), compost de la fraction fermentescible

des ordures ménagères (33 000 tonnes/an), compost de boues (plus de 110 000 tonnes/an), pour une majeure partie compost d'ordures ménagères dont la fraction organique est extraite mécaniquement sur le site de compostage (630 000 tonnes/an).

- les restitutions des cultures, dont l'importance peut être plus ou moins grande selon le type de culture, mais également selon les pratiques culturales, avec les restitutions obligatoires que sont les racines et les restitutions facultatives qui correspondent aux parties aériennes qui peuvent être laissées sur place et enfouies ou exportées (paille de céréales).

Evolution de l'aléa en régions de vignoble

L'aléa d'érosion en région de vignoble peut évoluer sous l'effet de différentes facteurs :

➤ Transformations du paysage et concentration du ruissellement.

- **L'allongement du parcellaire dans le sens de la pente et la suppression des obstacles** : la mécanisation de l'exploitation du vignoble est souvent accompagnée de travaux de remodelage de la parcelle. Celui-ci se fait généralement de façon à permettre la circulation des engins dans le sens de la pente et se traduit par des suppressions de talus et de murs de soutènement, parfois même de réseaux de drainage en place depuis des décennies. La longueur des rangs s'accroît, favorisant la concentration du ruissellement. Dans certains cas, la mécanisation conduit à la mise en place de terrasses horizontales permettant le passage des engins. Ces terrasses réduisent fortement les risques érosifs, mais restent rares (photographie 13).



Photographie 13 : terrasses horizontales dans le vignoble de Banyuls, réduisant l'effet de l'érosion ; C.Bardet.

- **Le « remplissage » homogène des versants** : autrefois, vignoble et polyculture coexistaient souvent sur un même coteau, ainsi que des bosquets jouant divers rôles dans l'économie de l'exploitation. Actuellement, la spécialisation des exploitations se traduit par le remplissage des versants avec de la vigne. La diversité des états de surface diminuant, le ruissellement

formé dans une parcelle de vigne a une moindre probabilité d'être dispersé ou infiltré dans une zone tampon avant d'atteindre le bas du versant.

- **L'extension du vignoble vers le haut des coteaux** : on assiste au défrichement de landes, friches et bois sur les hauts de versants (photographie 14), surtout dans les vignobles d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC). L'agrandissement des surfaces de vignes classées en AOC augmente une production à forte valeur ajoutée et permet parfois de jouer sur les rendements moyens (fixés par les cahiers des charges AOC), dans le cas où la production serait contingentée. Les nouvelles parcelles issues du déboisement sont en général plus pentues et favorisent ainsi le ruissellement.



Photographie 14 : déboisement du haut des coteaux en vue d'installation de nouvelles parcelles de vignes, vallée du Rhône ; Y.Le Bissonnais.

➤ Les pratiques agronomiques en vignobles

- **Evolution vers la non-culture et érosion : une relation complexe.**

Dans un certain nombre de régions de vignoble, la non-culture avec désherbage chimique a progressivement remplacé l'entretien du sol par labour. Mais les deux systèmes cohabitent dans la plus-part des régions.

Cette évolution se traduit par une certaine imperméabilisation du vignoble : on observe plus souvent du ruissellement qu'auparavant. Les nombreux passages d'engins augmentent le tassement du sol et forment des ornières qui accélèrent le ruissellement. Cependant, pour des épisodes pluvieux très exceptionnels, la moindre détachabilité du sol conduit à des écoulements boueux moins chargés que ceux que l'on aurait pu observer avec les mêmes parcelles entretenues par labour.

Le débat autour du rôle positif ou négatif de l'évolution des pratiques culturales par rapport aux écoulements boueux, tient au fait que l'on ne se réfère pas au même type d'épisode pluvieux :

- Soit l'on met en avant l'aggravation du ruissellement et des dégâts lors d'orages ordinaires ;

- Soit on souligne la réduction des écoulements boueux liés à des événements très exceptionnels.

La confusion dans ce débat est aussi alimentée par le fait qu'il est assez difficile de dissocier le rôle de l'évolution des pratiques culturelles de celui de l'évolution du paysage (allongement des parcelles, extension du vignoble vers le haut des coteaux, disparition de « zones tampons » sur les versants, urbanisation à l'aval de vallons à risques).

Voirie et urbanisation : coupables et victimes

L'urbanisation est assez souvent considérée comme un facteur important dans l'augmentation récente des dégâts.

Augmentation de l'aléa liée à la voirie et à l'urbanisation : les surfaces construites ou revêtues imperméabilisent le sol et augmentent le volume global des eaux non infiltrées qu'il faut gérer. Lorsque ces surfaces se développent en amont dans le paysage, elles peuvent contribuer à l'augmentation de l'aléa « coulées boueuses », si les réseaux de collecte et d'évacuation du ruissellement en place sont absents ou ne sont pas redimensionnés et bien entretenus (risque de voir apparaître des ravines se développant par érosion régressive). Si, comme c'est souvent le cas, le réseau pluvial n'est pas modifié, un bassin de retenue doit être construit entre celui-ci et les zones d'urbanisation récente. Le long des routes, l'absence ou le moindre entretien des fossés jouent dans le même sens (photographie 15).



Photographie 15 : amplification des effets du ruissellement par la voirie en Haute-Normandie ; C. Douyer.

Augmentation de la vulnérabilité liée à la voirie et à l'urbanisation : l'urbanisation des zones à risque situées à l'aval des bassins versants agricoles, notamment dans des vallées sèches, résulte d'un manque de vigilance ou d'une défaillance de la mémoire collective concernant les événements anciens. Parfois, ces zones ne sont devenues dangereuses que récemment, à la suite des transformations du paysage en amont. L'urbanisation est un facteur d'aggravation du risque de « coulées boueuses », dans la mesure où les coulées touchent des habitations plus nombreuses.

De façon plus chronique, les infrastructures de transport sont victimes de l'érosion : dépôts de terre sur la chaussée, voir destruction de celle-ci par sapement. L'extension du réseau routier se traduit par une aggravation du risque.

Conclusions sur l'évolution des risques et la crise érosive

Dans un certain nombre de régions, notamment Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Rhône-Alpes, Nord-Pas-de-Calais et Haute-Normandie (les 5 régions les plus touchées), on note une forte augmentation de la fréquence des écoulements boueux catastrophiques.

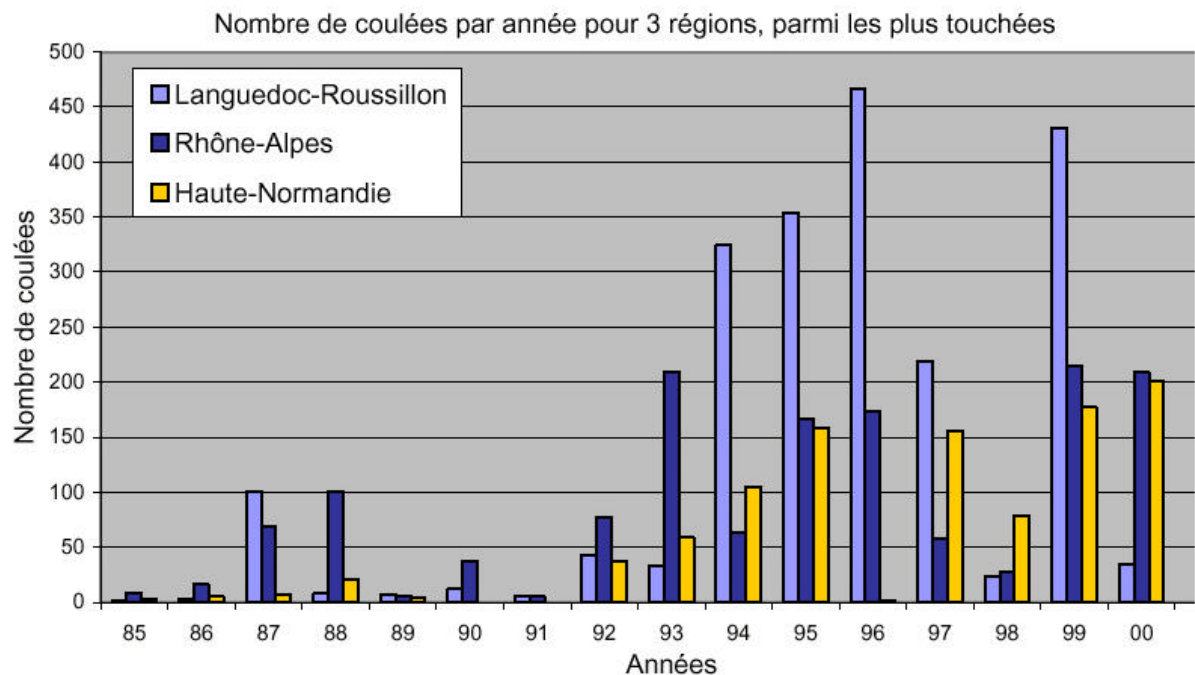


Figure 8 : nombre de « coulées boueuses » (dossier de demande d'indemnisation) par années pour trois régions parmi les plus affectées.

Source : base des coulées boueuses.

Cette augmentation du nombre de demandes d'indemnisation pour « catastrophe naturelle » résulte de l'évolution simultanée et rapide de plusieurs éléments : la transformation des paysages ruraux et urbains joue un rôle de premier plan alors que l'évolution des pratiques agricoles joue un rôle plus variable.

Les conséquences de ces transformations se révèlent de façon spectaculaire lors d'épisodes pluvieux exceptionnels ou lors d'années particulièrement pluvieuses, lorsque les zones touchées par les écoulements boueux catastrophiques sont particulièrement étendues ou lorsqu'il y a répétition de ces événements en un même lieu. Elles suscitent alors des débats sociaux et la mise en place d'études et d'actions.

➤ Mobilisation sociale très hétérogène et émergence difficile d'une mémoire collective

En fonction de la localisation des événements dans les bassins versants, la mobilisation sociale et la prise de conscience peuvent être plus ou moins fortes :

- **En amont**, les dégâts ordinaires entraînés par l'érosion chronique traduisent l'évolution récente du paysage rural. Mais ces dégâts ont un moindre pouvoir de mobilisation sociale et ne suscitent que rarement des débats et une prise de conscience de la crise ;
- **En aval**, l'aggravation des dégâts provoqués par les inondations semble surtout due à l'urbanisation des lits majeurs et à la disparition des « zones tampons » dans les vallées alluviales. L'impact des transformations du paysage rural sur l'aggravation des inondations est assez modeste, surtout pour les crues très exceptionnelles.

Dans un premier temps, les écoulements boueux catastrophiques sont souvent uniquement mis en relation avec le caractère exceptionnel de la pluie, d'où l'expression « catastrophe naturelle ». Une analyse plus poussée et moins fataliste conduit à relier ces dégâts non seulement au caractère exceptionnel des précipitations, mais aussi à l'évolution des paysages. Ainsi, une telle pluie devient le révélateur d'une évolution du paysage qui explique en partie la gravité des dégâts observés.

Une succession d'années à problèmes entretient le souvenir des catastrophes et maintient une certaine pression en faveur d'actions de prévention, d'aménagements ou de pratiques culturelles innovantes. A l'inverse, une succession d'années sans problèmes conduit à **l'oubli des catastrophes** et au relâchement de l'attention accordée à ce thème.

Enfin, il faut noter la place marginale des « coulées boueuses » vis-à-vis de risques plus classiques, tels que les inondations ou les mouvements de terrain. Il existe un décalage entre l'importance du phénomène « coulées boueuses » (en tant que « catastrophe naturelle ») et le caractère précaire de sa reconnaissance particulièrement dans les documents d'urbanisme. Les textes parlent d'inondation, de séisme, de mouvements de masse, mais rarement de « coulées boueuses ».

MODELISATION DE L'ALEA EROSION

Ce chapitre réactualise l'étude par l'INRA et publié par l'Ifen en 1998: «*Cartographie de l'aléa érosion des sols en France* ». Cette étude avait pour objectif de cartographier, d'une façon homogène sur l'ensemble du territoire Français, les risques d'érosion dans les espaces agricoles.

S'agissant d'une approche à l'échelle de l'ensemble du territoire français, les documents cartographiques présentés n'ont pas vocation à être agrandis ou analysés au niveau local. Ils ne peuvent fournir que des indications de tendance pour des portions de territoire de l'ordre de quelques dizaines de km², sachant que la variabilité locale des facteurs de l'érosion peut avoir une influence aussi grande que les grandes tendances mises en évidence par le modèle.

Les résultats que nous avons obtenus par maille élémentaire seront donc intégrés selon diverses unités spatiales permettant de mettre en évidence des tendances régionales.

Dans cette étude, l'érosion a été envisagée du point de vue des **surfaces émettrices de particules solides (érosion de versant)**, et non pas du point de vue du transport de ces particules dans les cours d'eau et de leur dépôt à l'aval. Dans cette optique, il y a érosion à partir du moment où le déplacement de particules dépasse la centaine de mètres ou sort d'une parcelle agricole, sans préjuger du devenir ultérieur de ces particules. D'autres processus (érosion de berges, régimes hydrologiques contrastés, etc.) influent sur la charge solide transportée par les fleuves. Ces processus seraient donc à prendre en compte en complément de l'aléa érosion de surface, pour caractériser l'érosion de grands bassins ou évaluer les apports de sédiments dans des retenues ou des estuaires.

Une autre spécificité de cette étude réside dans la **différenciation saisonnière de l'aléa** qui permet de rendre compte de la réalité des différents régimes climatiques que l'on retrouve sur le territoire national. Cette approche saisonnière permet en outre de prendre en compte les interactions entre facteurs climatiques et occupation des sols de manière beaucoup plus précise que dans une approche annuelle et donc de mieux prendre en compte les différents types d'aléas érosifs.

4.1 Etapes de la modélisation et de la cartographie

La cartographie de l'intensité de l'aléa érosion et des différents types de fonctionnements érosifs a été réalisée en plusieurs étapes : après avoir créé une base de données en sélectionnant les paramètres de l'érosion, puis mis au point le modèle, la cartographie elle-même a été élaborée en plusieurs temps.

Etape 1 : évaluation de la **sensibilité potentielle** des terrains à l'érosion, établie à partir du croisement de données sur les sols, l'occupation des sols et la pente ;

Etape 2 : évaluation de **l'aléa moyen d'érosion saisonnier intégré par unité spatiale** (cantons, bassins versants, petites régions agricoles et départements), obtenue par croisement de la **sensibilité potentielle** avec les précipitations moyennes saisonnières ;

Etape 3 : **zonage typologique des aléas** permettant de localiser les différents types d'érosion et ainsi de rapporter l'intensité de l'aléa au type de fonctionnement érosif.

4.2 Description du modèle

Paramètres disponibles pour évaluer les facteurs de l'érosion

Les paramètres rassemblés pour cette étude sont issus des couches d'information suivantes,

pour évaluer l'intensité de l'aléa :

- la base de données des sols de France à l'échelle du 1 : 1 000 000^e (source INRA),
- les données d'occupation des sols au 100 000^e de CORINE land cover (source Union-Européenne - Ifen) ;
- le modèle numérique de terrain de la France au pas de 250 m (source IGN),
- les données météorologiques moyennes mensuelles sur 30 ans du fichier AURELHY au pas de 5 km, et les fréquences moyennes de hauteurs de pluies en 1 heure dépassant certains seuils (source Météo-France), pour 95 stations ;

pour déterminer les types érosifs :

- le Recensement Général Agricole (RGA) de 1988 traité par petites régions agricoles (source Scees) ;
- la base de données des communes françaises de montagne et de haute montagne (ministère de l'Économie et des Finances et ministère de l'Agriculture).

Les sols : base pédologique au 1 : 1 000 000^e

Deux paramètres de la base de donnée des sols de France ont été extraits à l'aide de règles de pédo-transfert³ : la sensibilité du sol à la dégradation de sa structure superficielle sous l'action des pluies, communément appelée battance, et l'érodibilité des matériaux parentaux, qui correspond ici à la stabilité et à la cohésion de ces matériaux, c'est-à-dire à leur résistance au cisaillement et à leur plus ou moins grande facilité à être mobilisé par le ruissellement ou par des mouvements de masse.

L'effet de la matière organique sur la sensibilité des sols à la battance n'a pas été directement pris en compte dans la règle de pédo-transfert, et ce pour plusieurs raisons. D'une part, cette information n'est pas directement disponible dans la base et son extrapolation par une fonction de pédo-transfert ne serait pas suffisamment précise à cette échelle pour être intégrée dans le modèle. Cependant l'interprétation des propriétés physico-chimiques à partir du nom de sol qui est intégrée dans les règles de pédo-transfert tient compte indirectement du caractère plus ou moins riche en matière organique des types de sols. D'autre part, on peut considérer que cette information est indirectement intégrée par l'occupation des sols, les sols sous prairies et forêts étant généralement plus riches en matière organique que les terres arables défrichées depuis longtemps.

La base de données 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, pierrosité, nature du matériau parental, épaisseur du sol, etc.). Ces «unités typologiques» sont regroupées en « unités cartographiques » de sols pour être représentées à l'échelle du 1 : 1 000 000^e. En conséquence, toute unité cartographique correspond à une association d'unités typologiques de

³ Règle de pédo-transfert : ce terme est dérivé du concept de « transfert fonction », défini par BOUMA et Van LANEN (1986). Ces règles permettent d'interpréter une information qualitative contenue dans les paramètres d'une base de données sur les sols, et permettent de définir, à partir de cette règle de décision empirique, de nouvelles caractéristiques de sol plus complexes ou moins facilement mesurables.

sols dont on connaît uniquement le pourcentage de surface au sein de chaque association : c'est l'unité typologique dominante qui est représentée sur la carte.

Les règles de pédo-transfert sont mises au point pour estimer la sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance, à l'origine de l'apparition du ruissellement sur certains sols, et à l'érodibilité, qui intervient lorsque le ruissellement est déjà formé et qu'il est susceptible d'arracher le sol ou le matériau sous-jacent.

Ces règles s'appuient sur les informations relatives à la texture des sols, le matériau parental et le nom de sol. Elles sont basées sur la combinaison d'un paramètre physico-chimique commun aux deux règles (1) et de paramètres texturaux spécifiques à chacune des règles (2 et 3). Ces paramètres intermédiaires sont eux-mêmes établis à partir de règles de pédo-transfert.

(1) Le paramètre physico-chimique (5 classes) est dérivé du nom de sol (troisième niveau de la base) en prenant en compte l'effet positif ou négatif de la matière organique sur la stabilité structurale, des carbonates, des cations, et des autres caractéristiques pédogénétiques.

Les principales règles adoptées sont les suivantes :

Effet sur la stabilité structurale pour chaque type de sols :

très favorable	favorable	neutre	défavorable	très défavorable
Histosols.	Rendzine, Chernozem, Kastanozem, Greyzem, Phaeozem, Ferralsol.	Acrisol, Lithosol, Fluvisol, Regosol, Ranker, Vertisol, et tous les autres, sauf s'ils présentent l'un des caractères suivant : dystric, gleyic, albic, planic, spodic, qui les rend défavorables, ou calcaric, chromic, calcic, humic, qui les rend favorables.	Podzoluvisol, Podzol, Arenosol, Andosol, Planosol, Xerosol.	Solonchak, Solonetz.

(2) Règle pour estimer la battance (figure 9)

Le paramètre textural pour la battance est fonction des textures dominantes et secondaires (5 classes), et du type de matériau parental.

Les textures grossières, très grossières et très fines sont classées en faible battance ;

Les textures fines et moyennes fines sont classées soit en sensibilité forte, soit en sensibilité moyenne selon la texture secondaire et le matériau parental.

Le paramètre textural est ensuite combiné avec le paramètre physico-chimique.

Sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance

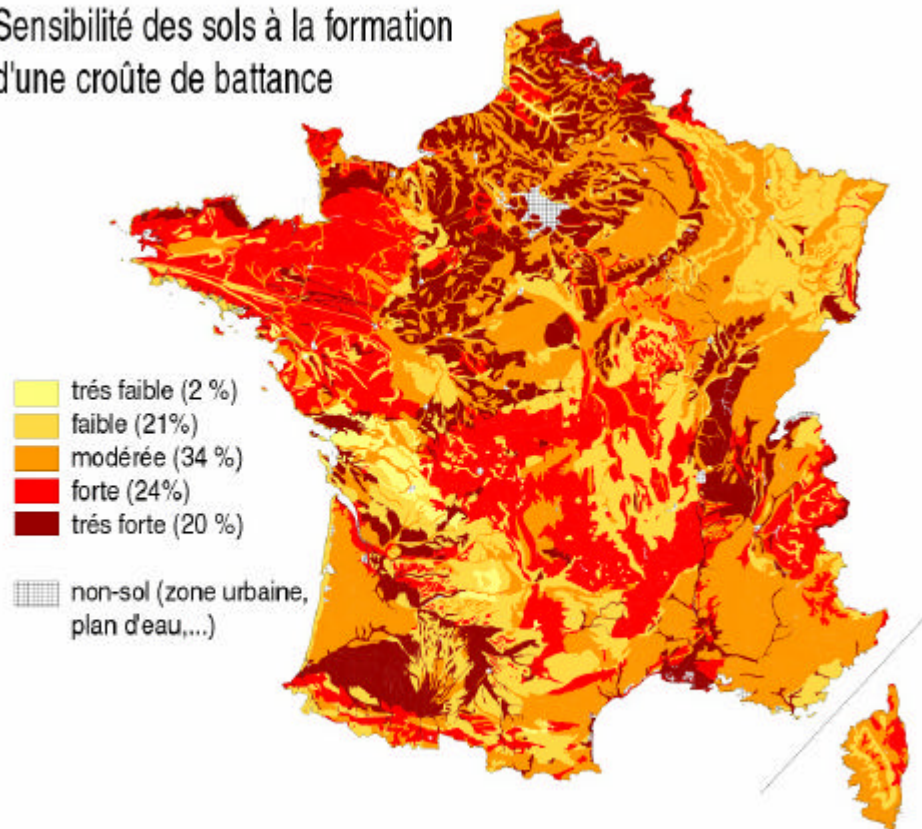


Figure 9 : carte de la battance.

Source : base de données géographiques des sols de France (INRA).

(3) Règle pour estimer l'érodibilité (figure 10)

Pour l'érodibilité, on considère que le paramètre textural est fonction des textures dominantes et secondaires (5 classes), et du matériau parental. Les roches massives comme le granite ou le calcaire sont classées en faible érodibilité, alors que les roches friables comme les sables ou les molasses sont classées en érodibilité forte, ainsi que les sols à texture grossière. Le paramètre textural est ensuite combiné avec le paramètre physico-chimique.

Classes d'érodibilité des sols

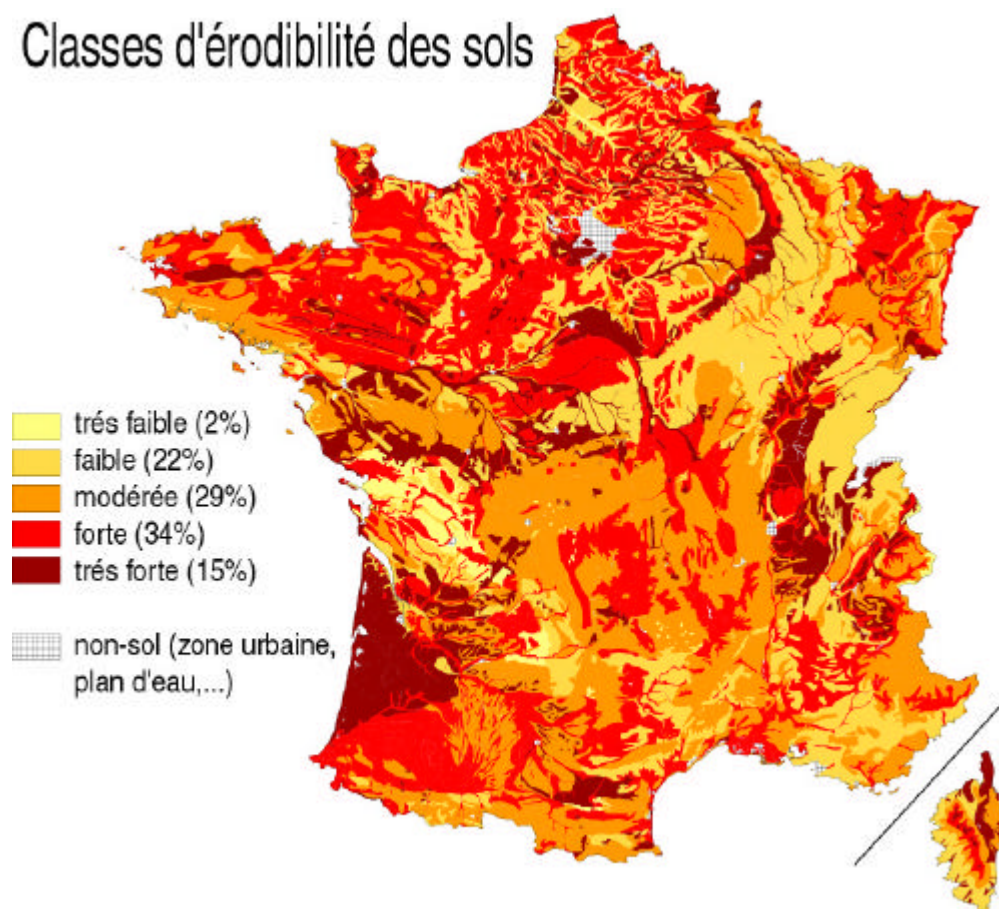


Figure 10 : carte de l'érodibilité.

Source : base de données géographiques des sols de France (INRA).

Remarque : du fait de la structure de la base de données des sols de France, les règles de pédotransfert sont plus ou moins fiables selon les types d'associations de sols.

L'occupation des sols (figure 11)

Les données d'occupation des sols de la base CORINE land cover ont été recueillies entre 1985 et 1992 mais pourraient être facilement réactualisées. A partir de la nomenclature initiale de la base en 44 catégories, les types d'occupation des sols ont été regroupés en 9 classes, chacune ayant un comportement spécifique vis-à-vis de l'érosion des sols.

Les 9 classes retenues sont les suivantes :

- **les terres arables**, qui peuvent être à nu pendant une période plus ou moins longue au cours de l'année ;
- **les prairies et pâturages**, qui protègent la surface et favorisent l'infiltration ;
- **les zones agricoles hétérogènes**, qui regroupent des unités assez différentes mais forment des paysages contrastés : parcellaire morcelé et diversifié, mosaïque de cultures, alternance de prairies, terres cultivées et bois. Cette diversité est un facteur limitant le ruissellement par rapport aux espaces ouverts comme les terres arables ;

- **les cultures permanentes**, qui regroupent les vignes et les vergers aux comportements érosifs similaires ;
- **les forêts et les zones arbustives**, peu sensibles à l'érosion sauf sur des pentes très fortes et des terrains instables ;
- **les zones naturelles dégradées**, qui sont des 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) ;
- **les espaces ouverts**, sans végétation : roches nues, glaciers et plages ;
- **les zones d'eau libre** : mers, lacs, rivières, et zones humides (marais et rizières) ;
- **les territoires artificialisés**, 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.

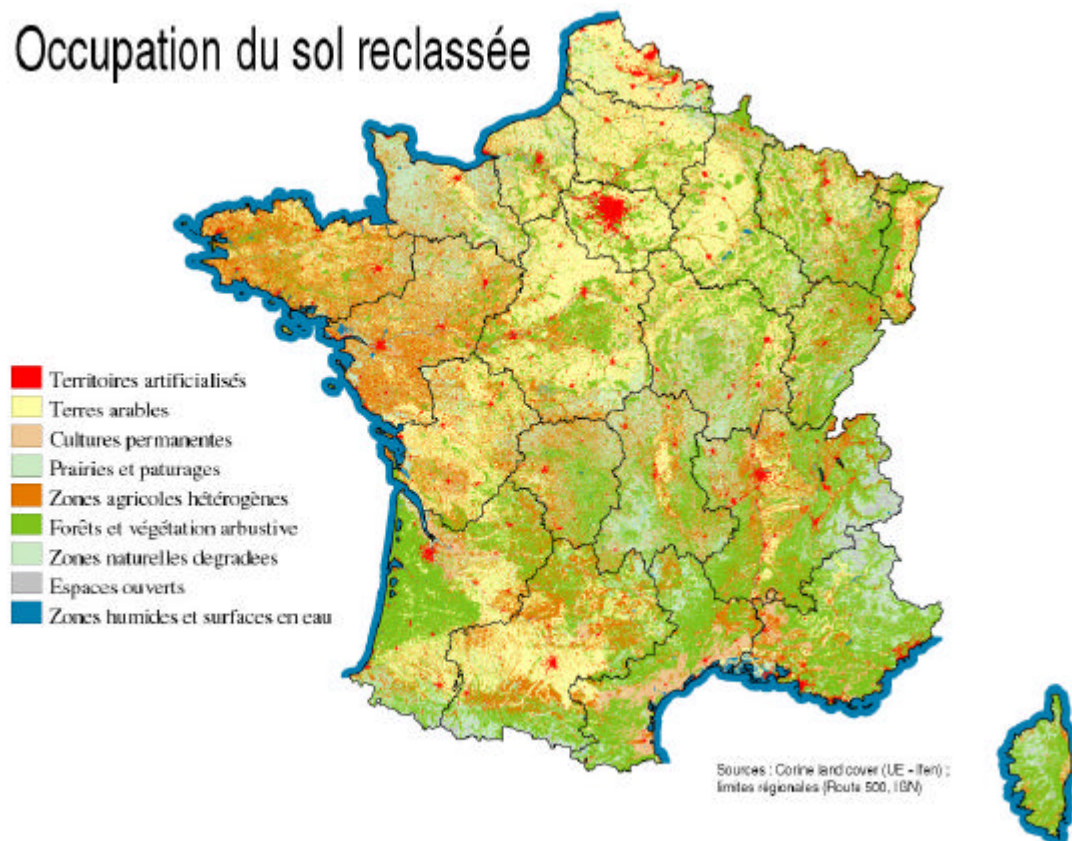


Figure 11 : Carte de l'occupation des sols reclassée en 9 classes.

Source : CORINE land cover, UE - Ifen.

❑ Les types de cultures

Les données du RGA de 1988 ont été prises en compte pour définir les types érosifs mais n'ont pas été utilisées pour évaluer l'intensité de l'érosion. L'information est fortement simplifiée car elle présente une classe de pourcentage de surface de « cultures d'hiver », « cultures de printemps » et « cultures permanentes » au sein de chaque Petite Région Agricole (PRA).

Le RGA de 1988 est aujourd'hui ancien, et il conviendrait de le réactualiser pour remettre à jour la carte des types érosifs. Cependant, cette typologie regroupe en grands ensembles de vastes portions du territoire français et de ce fait n'est pas directement soumise à des variations locales, à moins que ces modifications ne couvrent une large surface.

❑ Le relief (figure 12)

Le modèle numérique d'altitude (MNA) de la France à la maille de 250 m a été choisi pour sa bonne précision à cette échelle, et c'est lui qui nous a également servi à définir la maille de base de rasterisation de toutes les couches d'informations. En effet, cette maille offre un bon compromis entre la précision requise pour ce travail et le volume des données à traiter. La pente moyenne de chaque maille (en pourcentage) est calculée à partir de la différence d'altitude la plus grande entre cette maille et ses 8 voisines.

Les valeurs de pentes ont été regroupées en 8 classes et les limites ont été choisies en fonction des connaissances de terrain ou des valeurs proposées dans la littérature.

Les classes de pentes retenues sont les suivantes :

0-1% ; 1-2% ; 2-5% ; 5-10% ; 10-15% ; 15-30% ; 30-75% ; > 75%.

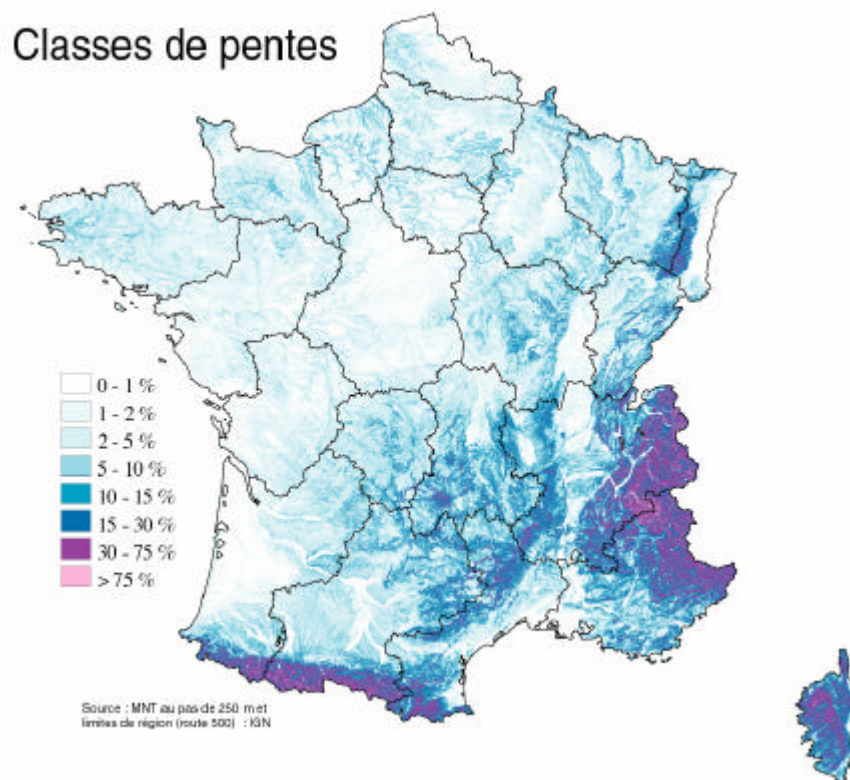


Figure 12 : carte des pentes.

Source : MNT IGN (pas de 250 m).

❑ Le climat

La pluie est le facteur principal de l'érosion hydrique, et son érosivité dépend essentiellement de sa hauteur et de son intensité. Nous avons donc cherché à combiner ces deux paramètres.

Les données climatiques de base se présentent sous la forme d'une information ponctuelle (stations météorologiques). Météo France a développé une méthode (Aurelhy ; in Bennichon et Lebreton, 1987) pour spatialiser ces données, qui tient compte de «l'environnement topographique » des stations (situation de col, de crête, de vallée, etc.) et du relief (gradient d'altitude). La méthode repose sur l'utilisation de 1 342 stations dont les données, correspondant à la période 1951-1980, sont très fiables, et disponibles au pas de temps journalier sur une trentaine d'années. La carte résultante se présente sous la forme d'une couche informatique maillée au pas de 5 km avec une valeur de hauteur de pluie moyenne par maille. Ces valeurs de hauteurs de précipitations moyennes ont ensuite été reclassées en quintiles pour chaque saison climatique.

En ce qui concerne les intensités des événements pluvieux, les informations sont beaucoup moins nombreuses et nous avons retenu la fréquence moyenne par saison des hauteurs de pluies supérieures ou égales à 15 mm en 1 heure. Ce choix offre un bon compromis entre une précision satisfaisante et une discrimination suffisante pour faire ressortir les fortes intensités des pluies de la zone méditerranéenne.

Ces valeurs, disponibles pour 95 stations, ont été généralisées sur tout le territoire à l'aide d'une interpolation linéaire. On obtient ainsi une carte des fréquences de pluies supérieures à 15 mm en 1 heure, couvrant tout le territoire.

Pour tenir compte à la fois des hauteurs et des intensités de précipitations, nous avons combiné les deux paramètres : lorsque l'intensité est moyenne ou forte, la classe de précipitations est augmentée d'un niveau ou deux par rapport à la classe des hauteurs de pluie.

De plus, l'aléa des terres cultivées (terres arables et zones agricoles hétérogènes) a été diminué d'une classe au printemps et en été, afin de prendre en compte la croissance du couvert végétal durant l'année culturale.

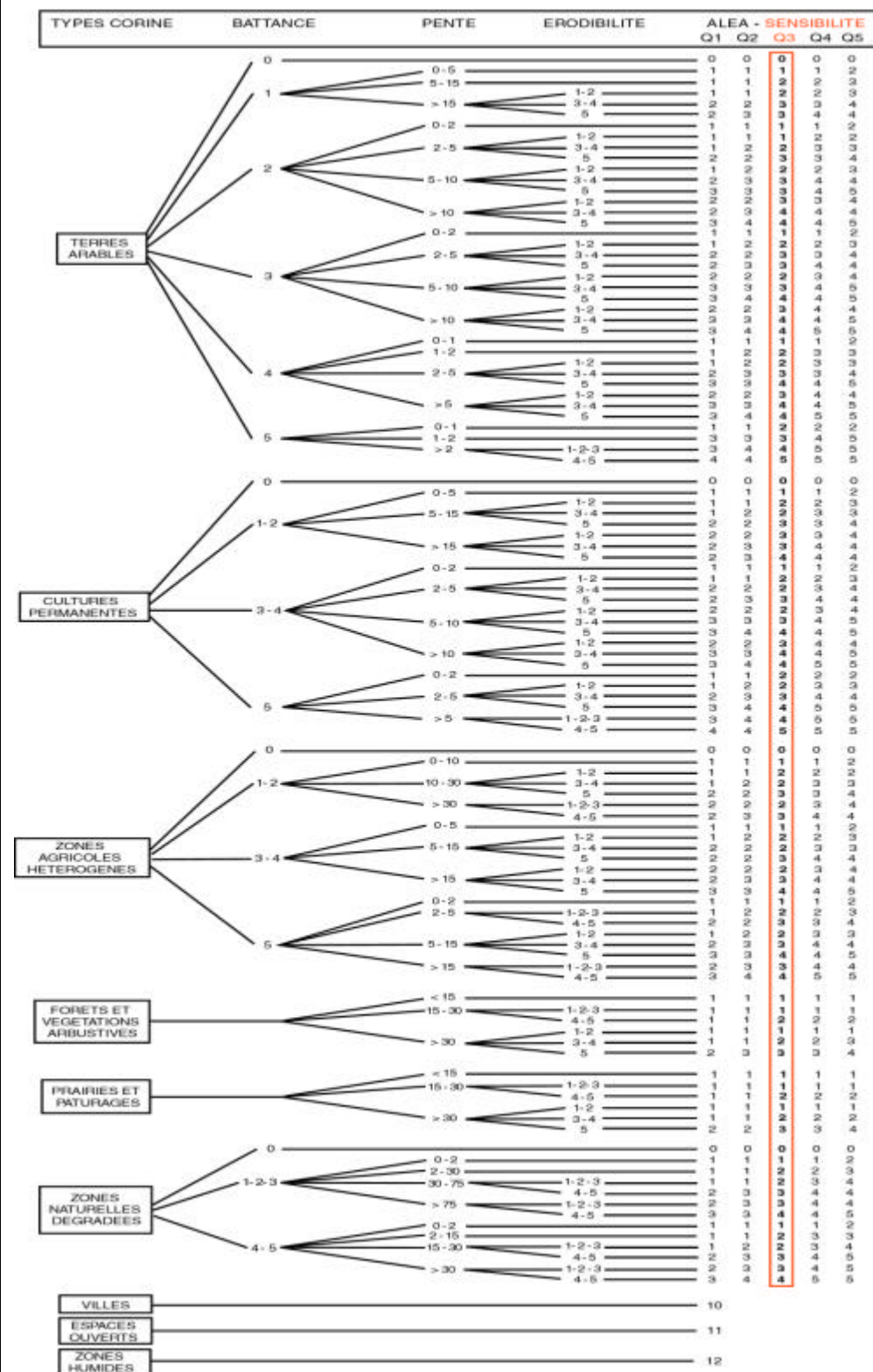
Principes du modèle

➤ Principes de base

Le modèle est de type système expert, utilisant une méthode de croisement de paramètres sous forme de combinaisons logiques (figure 13). Les paramètres sont hiérarchisés et pondérés à partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs. A chaque combinaison est affecté un code de sensibilité à l'érosion des sols. Ce modèle est qualitatif, et il est représentable sous la forme d'une arborescence logique.

Chaque couche d'information (figure 14a, b, c,d) est d'abord maillée au pas de 250 m, pixel défini par la plus petite unité spatiale informée (maille du modèle numérique de terrain). Certaines couches d'information, comme CORINE Land Cover, perdront parfois en précision, tandis que d'autres, comme les sols par exemple, seront subdivisées en mailles de 250 m.

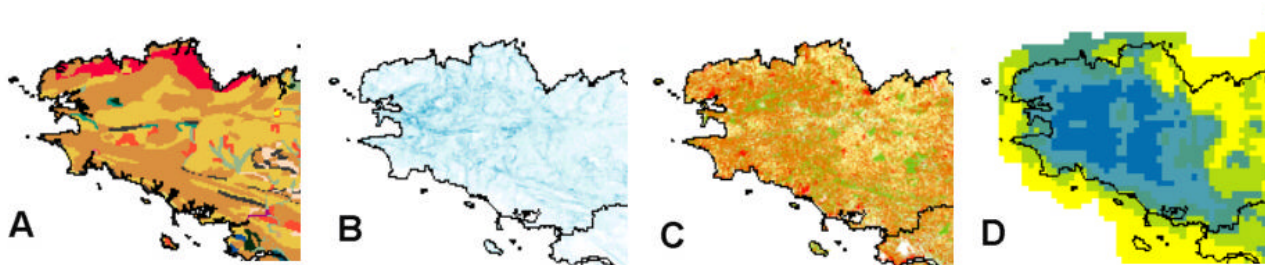
Figure 13 : modèle arborescent pour le calcul de l'aléa érosion.



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).



A : base géographique des sols de France (1 : 1 000 000); INRA.

B : MNT au pas de 250 m; IGN.

C : CORINE land cover ; UE - Ifen.

D : précipitations, base Aurelhy ; Météo France.

Figure 14 a, b, c, d : couches d'information disponibles pour le modèle de calcul d'aléa.

➤ Hiérarchisation et combinaison des facteurs

L'établissement d'un modèle arborescent implique de déterminer l'ordre d'entrée des paramètres dans l'arborescence. Nous avons choisi une hiérarchie privilégiant les facteurs sur lesquels les activités humaines peuvent avoir une influence, et dans l'ordre : l'occupation des sols, la battance, les pentes, l'érodibilité des terrains.

A la suite du croisement de ces facteurs, on définit 5 classes (très faible, faible, moyen, fort, très fort), exprimant la sensibilité « agro-pédo-géomorphologique » potentielle de chaque maille.

Cette sensibilité potentielle des terrains est ensuite combinée avec les données sur le climat de chaque saison pour aboutir à un aléa d'érosion saisonnier, également en cinq classes.

➤ Unités Spatiales d'Intégration

Les résultats obtenus ont été intégrés selon différentes unités spatiales d'intégration (USI). Plusieurs types d'unités ont été envisagés :

- **les bassins-versants**, qui sont les unités spatiales de fonctionnement des processus ;
- les **Petites Régions Agricoles (PRA)**, qui sont des unités relativement homogènes au sein desquelles la variabilité spatiale des facteurs de l'érosion pris en compte dans le modèle (types de cultures, caractéristiques du milieu) est relativement faible ;
- des **unités administratives** : commune, canton, département, région, qui permettent la confrontation avec d'autres sources d'information disponibles selon le même découpage et qui correspondent à des unités décisionnelles.

L'intégration automatique des aléas par USI est réalisée à l'aide d'une règle de décision prenant en compte les pourcentages de surfaces de chaque classe d'aléa dans l'USI (voir annexe 1). Les seuils de pourcentages de chaque classe à partir desquels est affectée une certaine valeur d'aléa ont été choisis à partir de l'analyse des résultats du modèle.

Les résultats sont présentés à l'aide de cartes des aléas d'érosion intégrées par bassins versants, PRA, cantons et départements (figure 15). L'ensemble des cartes et les fichiers de valeur des aléas de ces différentes unités spatiales et pour chaque saison sont téléchargeables sur les serveurs de l'Ifen ou de l'INRA d'Orléans, unité INFOSOL).

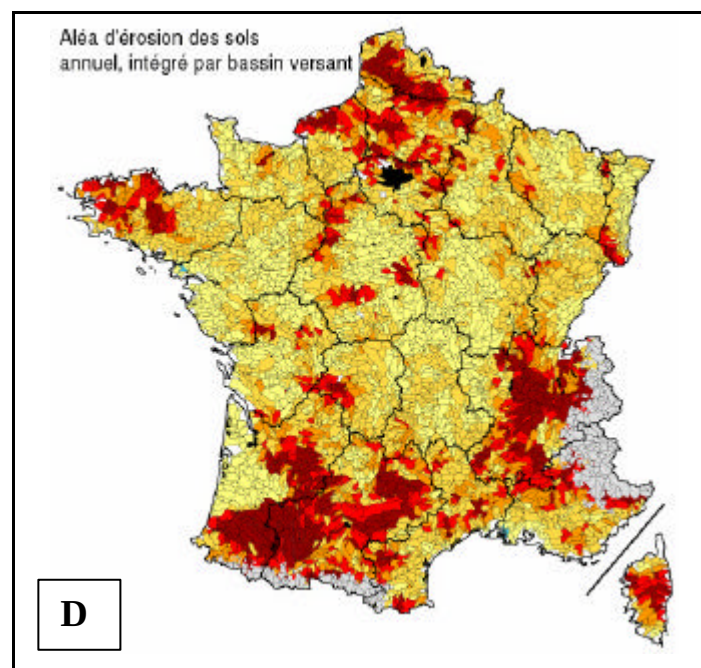
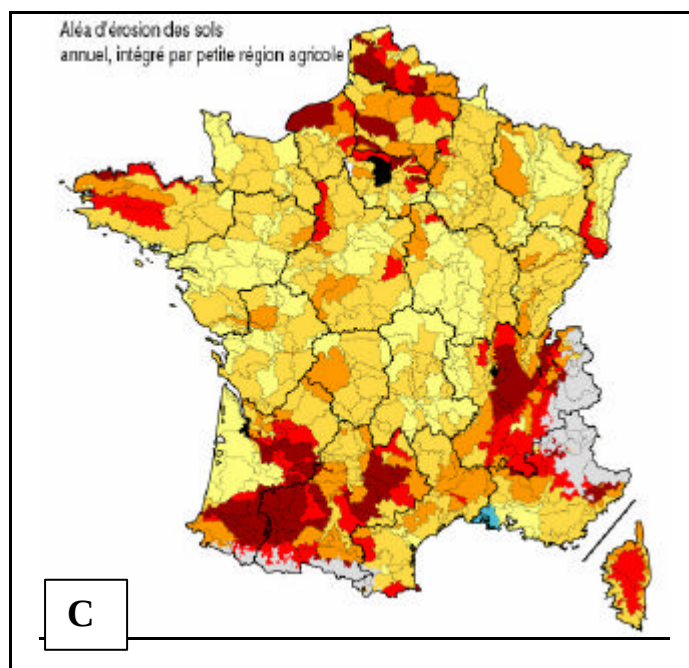
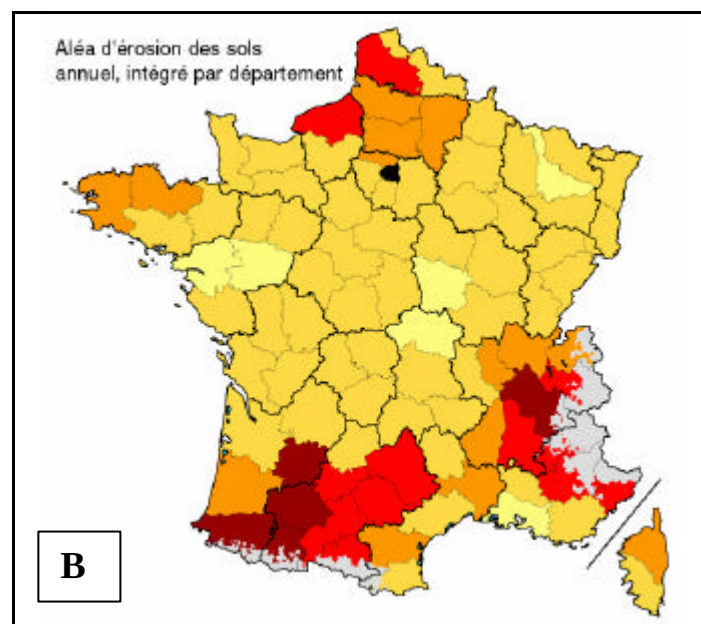
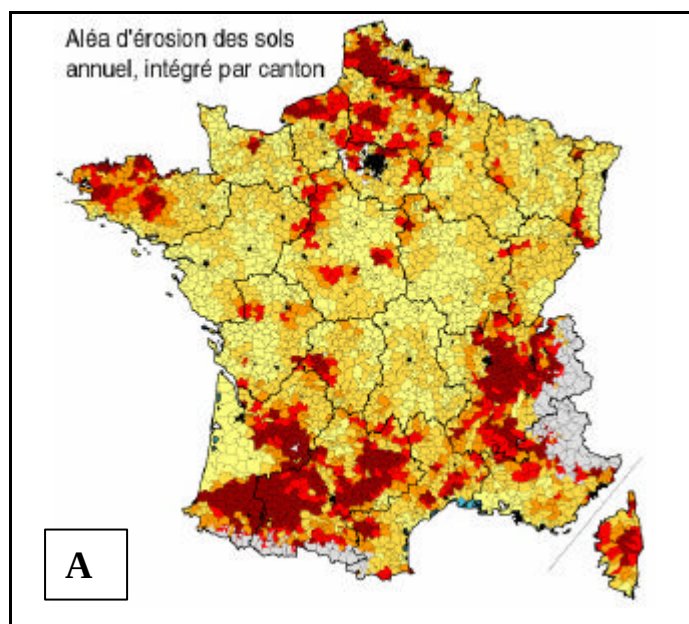


Figure 15 : aléa d'érosion des sols intégré par

- A :** Canton
- B :** Département
- C :** Petite région agricole
- D :** Bassin versant.



Cartographie : INRA Orléans, Kaléidos.



4.3 Cartographie de la typologie des aléas (figure 16)

Le modèle mis au point est basé sur la typologie des phénomènes érosifs, présentée au §2.2, mais cette typologie n'apparaissant pas explicitement sur les documents cartographiques, il était donc nécessaire de compléter ces cartes par un document illustrant la répartition spatiale de cette typologie. De plus cette dernière s'appuie sur des informations qui n'ont pas été utilisées pour évaluer l'intensité des risques : les types de culture, issues du RGA, et la délimitation des zones de montagne.

Typologie des aléas d'érosion des sols par petite région agricole

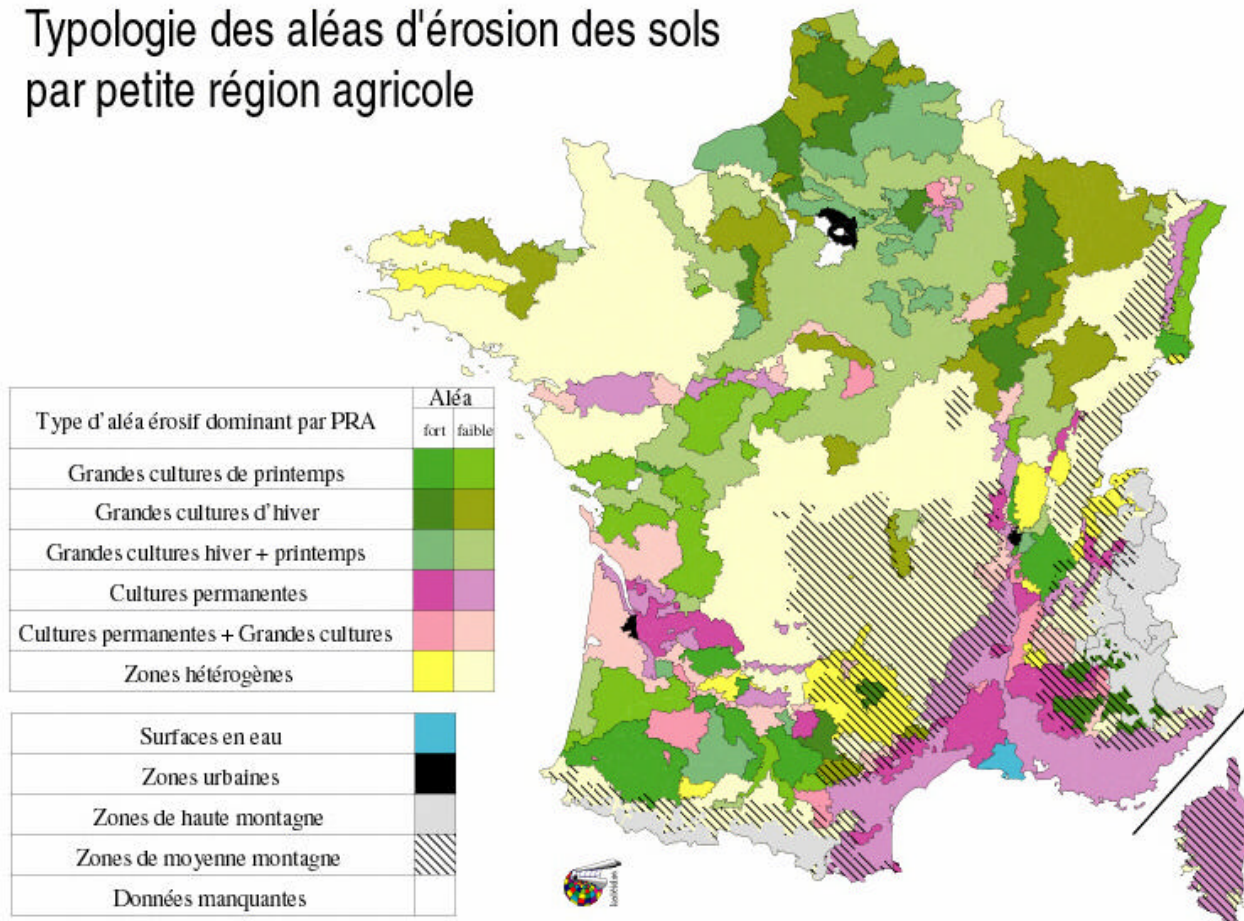


Figure 16 : cartographie de la typologie des aléas par petite région agricole.

Les différents types érosifs cartographiés sont les suivants :

- Type 1 : grandes cultures de printemps ;
- Type 2 : grandes cultures d'hiver ;
- Type 3 : mixte grandes cultures de printemps et d'hiver ;
- Type 4 : cultures permanentes ;
- Type 5 : mixte cultures permanentes et grandes cultures ;
- Type 6 : zones hétérogènes.

L'intensité des aléas est différenciée en 2 classes pour chacun de ces types : le même aléa d'intensité forte (classes d'aléa fort et très fort) ou faible (classes d'aléa très faible, faible et moyen) est représenté de la même couleur mais en teinte sombre ou claire.

4.4 Analyse des résultats

Pour analyser les résultats obtenus par le modèle, nous nous sommes appuyés sur des études régionales relatives à l'érosion des sols, sur des avis d'experts ainsi que sur les résultats de l'étude des « coulées de boue » en France, décrite dans le chapitre précédent. Concernant cette dernière, il faut tenir compte du fait que les cartes des « coulées boueuses » ne sont pas des cartes de sensibilité à l'aléa, et que les phénomènes érosifs sont mal représentés lorsque la vulnérabilité est faible (zones peu urbanisées).

Il faut souligner que le modèle utilisé est général pour toute la France et basé sur seulement 5 paramètres, il ne peut donc prétendre englober tous les phénomènes rencontrés sur le territoire. Il s'agit de rendre compte des grandes tendances de la sensibilité des petites régions agricoles vis-à-vis des principaux facteurs de l'érosion hydrique. Les cartes des paramètres d'entrée du modèle peuvent permettre d'interpréter les résultats en terme d'aléa.

La visualisation simultanée des quatre cartes saisonnières de l'aléa par PRA (figure 17) met bien en évidence la variabilité inter-annuelle de l'aléa érosion, mais aussi l'existence de régions systématiquement concernées. Les résultats de l'aléa intégré par PRA pour chaque saison individualise plusieurs unités :

- les régions fortement touchées par l'aléa érosion des sols en toutes saisons (le nord, le nord et l'est du Bassin parisien, la vallée du Rhône et les Alpes, le sud-ouest),
- les régions modérément touchées, ou pour lesquelles l'aléa érosion existe pour certaines saisons seulement (le pourtour méditerranéen et la Corse, le Poitou-Charentes, la Bretagne et l'Alsace),
- les régions qui ne sont pratiquement pas concernées par l'aléa érosion.

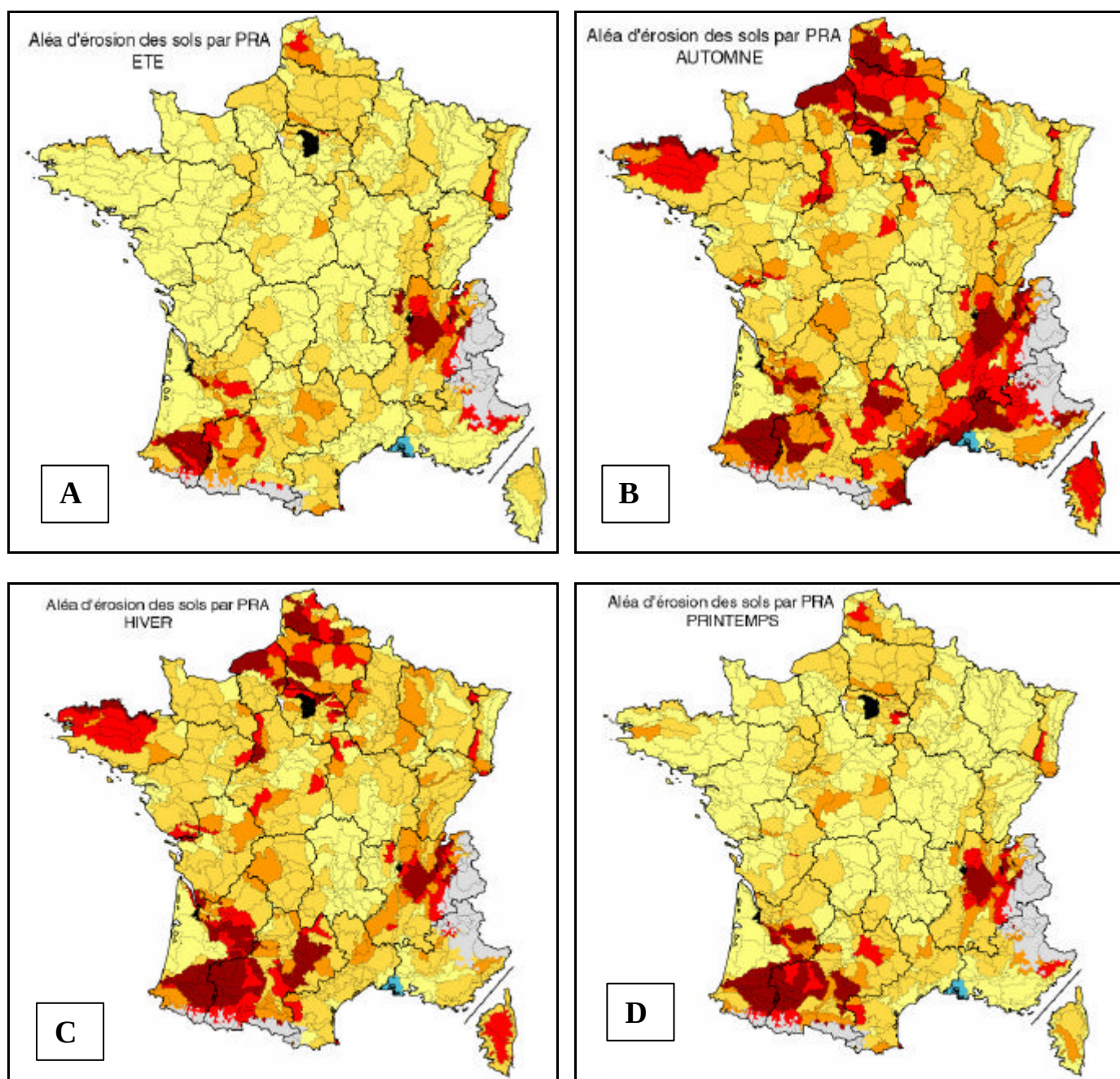


Figure 17
Aléa d'érosion des sols intégré par petite région agricole pour chaque saison.

A : été
B : automne
C : hiver
D : printemps

Cartographie : INRA Orléans, Kaléidos.



Les trois régions du nord de la France (Nord-Pas-de-Calais, Picardie, Haute-Normandie)

Ces trois régions sont très concernées par l'aléa érosion des sols en toutes saisons. Malgré les faibles pentes, les sols sont très sensibles à la battance et largement cultivés. L'érosion est d'autant plus préoccupante que les sols sont laissés à nu pendant une longue période et que les précipitations sont importantes. L'érosion en hiver concerne plutôt le nord et le pourtour Est du bassin parisien, tandis que le centre du Bassin Parisien est touché à la fois au printemps et en hiver.

Dans l'ensemble, l'aléa le plus fort correspond aux terrains très arrosés et limoneux en bordure du littoral, ou aux pentes un peu plus prononcées, comme les collines de l'Artois.

La **Haute-Normandie** est fortement sensible aux problèmes d'érosion au nord de la Seine, où les faibles pentes suffisent à créer des problèmes graves sur ces sols très battants (Boiffin et al., 1986 ; Papy et Douyer, 1991 ; Ouvry, 1992). Le sud de la région est beaucoup moins touché car les pentes et la pluviométrie y sont plus faibles et les sols moins sensibles à la battance.

Par ailleurs, on remarque un aléa important dans le **Pas-de-Calais**, qui correspond à une forte vulnérabilité liée à l'urbanisation de la région. L'aléa érosif en automne et en hiver existe aussi dans les collines Nord du Boulonnais (King et al., 1991).

On remarque aussi un ensemble d'aléas forts au sud de la Picardie et nord de l'Ile-de-France où l'érosion, bien connue dans ce secteur, est dévastatrice (Derville, 1994 ; Devaux, 1995). De la solifluxion en masse et des glissements de terrains sont même possibles.

La couronne est du Bassin Parisien (Ile-de-France, Champagne, Bourgogne)

Dans ces régions alternent un aléa fort sur sols limoneux cultivés, et des espaces sans érosion couverts de forêts (généralement sur les fronts plus abrupts des cuestas) ou sur des sols peu sensibles à la battance.

- **L'Ile-de-France** : dans les zones agricoles, l'Ile-de-France est touchée par l'érosion sur grandes cultures et sols fortement battants, surtout en hiver. L'urbanisation très forte de la région est à l'origine de deux phénomènes : une vulnérabilité forte de la grande banlieue, où un grand nombre de « coulées de boue » a été recensé, et l'imperméabilisation des sols sur de vastes surfaces, qui entraîne des problèmes d'origine plutôt urbaine. Les conséquences des phénomènes érosifs sont aggravés par le transfert de polluants via les matières en suspension dans les cours d'eau.
- **La Champagne et le nord de la Bourgogne** : on peut y distinguer deux cas différents pour les problèmes d'érosion dans ces régions :
 - **L'érosion sur versants assez raides** ou sur sols peu stables ; par exemple le Pays d'Othe et la région de Sens, sur pentes raides. Au centre de la Champagne, l'aléa est moins fort ;
 - **L'érosion dans le vignoble** : elle est liée à l'instabilité des sols ou du substratum des territoires viticoles. Par exemple sur la montagne de Reims, les problèmes sont importants et se manifestent par de nombreuses « coulées de boue » et des glissements de terrain sur les versants raides (Ballif et Herre, 1984 ; Morfaux, 1989 ; Pommier, 1995). Les vignobles du mâconnais et de la Côte chalonaise présentent aussi des problèmes d'érosion (Litzler, 1988 ; Durousset, 1994). Dans le vignoble du Jura, des « coulées de boue » et des glissements de terrain peuvent se produire, le modèle indique un aléa moyen en automne-hiver. Peu de « coulées de boue » se sont produites car des aménagements de

protection ont été mis en place depuis longtemps dans le vignoble. Le reste de la région n'est pas très exposé aux phénomènes érosifs, du fait d'espaces agricoles hétérogènes ou forestiers.

L'Alsace

Deux types de problèmes peuvent se présenter dans cette région :

- **L'érosion sur grandes cultures de printemps**, qui touche le Sundgau au sud de l'Alsace dont la raison essentielle vient de la sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance (sols limoneux) ;
- **Les problèmes liés aux « coulées de boue » dans le vignoble** : le vignoble alsacien est situé sur des versants très raides. L'érosion est surtout importante dans le sud du vignoble, région soumise en été à des orages de forte intensité.

Les Alpes et la vallée du Rhône

- **Les Alpes** : les unités spatiales d'intégration (USI) apparaissant en gris sont des espaces de haute montagne (altitude moyenne supérieure à 1 200 m) et ne font pas partie du champ de cette étude. Les autres zones de montagne présentent toutes un aléa plus ou moins fort de phénomènes catastrophiques montagnards (coulées de débris, ravinements sur fortes pentes, laves torrentielles, glissements de terrains, etc.). On peut remarquer la zone d'aléa fort en toutes saisons excepté en hiver, dans les Alpes du sud autour de Barcelonnette, ou de forts mouvements de masses se développent sur les flysch et les marnes noires.
- **La vallée du Rhône** : les risques y sont forts, surtout au printemps et en automne. Le modèle fait assez bien ressortir les différentes unités morphologiques :
 - La Côtière de Dombes est fortement touchée par les « coulées de boue ». Les problèmes viennent du fait qu'il y a des sols battants cultivés sur le plateau et des pentes fortes à l'aval sur lesquelles se concentre le ruissellement. On remarque une forte proportion de cultures de printemps, particulièrement sensibles en cette saison pluvieuse ;
 - Le Beaujolais est aussi très affecté toute l'année par l'érosion dans le vignoble. Les problèmes sont connus et des politiques de lutte contre l'érosion ont été mises en place depuis longtemps (Pellet, 1993) ;
 - Au nord de la Drôme, l'étude sur les « coulées de boue » avait déjà fait ressortir cette zone peu connue comme étant sensible à l'érosion, et le modèle confirme cette sensibilité en toutes saisons. C'est un paysage vallonné couvert de sols battants et dont les cultures de printemps représentent 30 à 50% des cultures ;
 - Le vignoble et la zone agricole le long du Rhône sont des zones un peu moins sensibles, mais l'aléa reste fort (surtout en automne).

Le Sud-Ouest (Aquitaine et Midi-Pyrénées)

Ces régions méridionales présentent de vastes zones à risques très forts, notamment à cause des précipitations très élevées, en particulier sur les reliefs.

- **La Gascogne** : l'aléa très fort et largement répandu s'explique par une grande sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance, ou par la présence de sols sableux à forte détachabilité. De plus, les cultures sont installées sur des collines aux pentes marquées (plus de 50% de cultures de printemps dans les zones cultivées), et les précipitations sont élevées et agressives en toutes saisons. Les « coulées de boue » y sont aussi nombreuses, mais les dommages subis par les collectivités sont plus limités que les dégâts aux territoires agricoles.
- **Le vignoble Bordelais** : en Aquitaine, l'aléa érosion dans les vignobles existe mais reste peu intense (sauf en hiver). La culture de la vigne n'est pas le facteur principal du déclenchement de l'érosion, même si elle peut localement aggraver la sensibilité au ruissellement. L'érosion s'explique plutôt par une combinaison de pentes assez fortes et de sols sensibles à la battance.
- **La région de Toulouse** : dans cette région de nombreuses « coulées de boue » ont été déclarées (certaines sont difficilement discernables des inondations), et le modèle indique un aléa fort au printemps et en hiver. En effet, malgré de faibles précipitations moyennes saisonnières, les problèmes d'érosion dans cette région s'expliquent par la combinaison de violents orages et d'une forte proportion de cultures de printemps sur des pentes fortes. Les sols ne sont pas sensibles à la battance du fait de leur teneur en argile élevée, mais le ruissellement prend naissance dans les zones où la molasse affleure ou sur les terrasses anciennes recouvertes de lambeaux de limons.
- Dans le **Lauragais**, l'aléa érosif est élevé au printemps et en hiver et de nombreuses « coulées de boue » ont été recensées. Le facteur primordial expliquant les problèmes dans cette région est le relief, les versants étant raides, quoique courts (de 250 m à 1 km). Les cultures se trouvent sur des versants en pentes assez fortes (10 à 20%), sur des parcelles qui occupent souvent toute la longueur du versant, et le ruissellement n'est pas arrêté par des obstacles qui coupent le versant (Revillon, 1984 ; Dubucq, 1989).
- **L'Aveyron** : une zone de forte sensibilité apparaît dans ce département. Les aléas peuvent être de 2 types :
 - un aléa de type montagne, suivi par le service RTM de la région : les pentes sont fortes et les conditions climatiques méditerranéennes sont à l'origine d'orages violents et de fortes précipitations au printemps et en automne.
 - l'aléa fort de la zone des « rougiers de Camarès » : des cultures fourragères se trouvent sur des versants en pente forte (pentes dominantes entre 20 et 40%), les sols sont naturellement sensibles et peu épais et le substrat est très friable (alternance de faciès schisteux et argilo-marneux). Le défrichement de ces terrains depuis 40 ans est à l'origine des nombreux problèmes d'érosion : 80% des terres cultivées sont affectées par une érosion en nappe et on remarque aussi de l'érosion en rigoles, en ravines et en bad-lands (Guillerm, 1994 ; Barthès et al., 1997).

Le Centre-Ouest (Aquitaine nord, Poitou-Charentes et Limousin)

- **La région de Limoges** : une zone d'aléa moyen en automne-hiver apparaît autour de Limoges, et on a pu y constater quelques « coulées de boue ». Bien que ce secteur ne soit pas connu des experts, il est possible que de l'érosion survienne, du fait de précipitations relativement fortes en toutes saisons. Cependant, la quantité de matière organique dans ces

terrains est élevée, les sols sont donc très stables, et l'hétérogénéité du paysage n'est pas spécialement favorable à l'érosion.

- **Le sud du Limousin :** l'aléa est faible mais une grosse concentration de « coulées de boue » met en évidence des problèmes de stabilité du substrat. En effet, des glissements de terrain et de la solifluxion peuvent survenir lorsque des pluies très fortes saturant les argiles, qui glissent alors facilement ou chargent les rivières de boue (Meynier, 1961 ; Soulier, 1995). Toutefois ce ne sont pas des phénomènes d'origine agricole (ils ne sont donc pas mis en évidence par le modèle).

La Bretagne

Une partie de la région est affectée par une érosion principalement de printemps, modérée mais générale, notamment érosion en nappe sur sols limoneux (Ceresa, 1987). Des phénomènes catastrophiques peuvent survenir : un certain nombre de « coulées de boue » ont été déclarées dans toute la région. Les cultures de printemps représentent 15 à 30% des terres cultivées, particulièrement sensibles à l'érosion lorsqu'une croûte de battance épaisse recouvre les sols à la fin de l'hiver (Cros-Cayot, 1996).

L'aléa fort cartographié au nord-ouest correspond à des cultures légumières plantées sur des pentes plutôt faibles, mais fortement arrosées et laissant les sols à nu pendant une bonne partie de l'année. Ailleurs, les sols ont généralement de fortes teneurs en matière organique, qui a pour effet d'améliorer la stabilité structurale et donc de limiter l'érosion.

La zone méditerranéenne et la Corse

L'aléa dans ces régions n'apparaît pas à première vue comme très important, à part en automne, vu l'importance des précipitations à cette saison. L'érosion est cependant d'autant plus importante qu'elle résulte d'averses intenses survenant en été et plus fréquemment en septembre-octobre, après une longue période sèche. Des averses d'automne peuvent par exemple atteindre une intensité d'environ 50 mm/h pour une averse d'une heure (durée de retour 5 ans).

De même, l'érosion peut être localement catastrophique, et développer des bad-lands, mais ces phénomènes très locaux n'apparaissent pas à cette échelle. On peut néanmoins remarquer quelques régions sensibles :

- **Le vignoble dans la région Languedoc-Roussillon :** le vignoble couvre une très grande superficie dans cette région, et il est souvent continu sur les versants et parfois planté sur des pentes fortes. Les sols sont peu battants à l'échelle de la France, mais ils peuvent être assez instables localement, notamment à cause de la dessiccation du sol sous l'effet de l'alternance de périodes très sèches et de fortes pluies (Le Dain, 1988).
- **La région Provence-Alpes-Côte-d'Azur :** la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur étant fortement montagneuse, l'aléa cartographié est essentiellement de type montagne, c'est à dire charriage torrentiel et mouvements de masse, ou de type cultures permanentes. De nombreuses « coulées boueuses » ont été notées entre Cannes et Nice sur le littoral, qui sont liées à la vulnérabilité des espaces urbanisés, très forte à cet endroit.

- **La Corse** : l'aléa fort de la Corse centrale est à classer dans le type érosion de montagne, avec des coulées de débris notamment, mais n'est pas d'origine agricole. Par contre, on note un aléa en automne-hiver dans la plaine d'Aléria et dans les vignobles des coteaux de la côte Est, qui coïncident avec de nombreuses « coulées de boue ». Les sols sont peu stables, et le contact entre la montagne et la plaine est abrupt. Les villages situés aux débouchés des torrents sont parfois touchés par des coulées, mais ce ne sont pas des phénomènes d'origine agricole, bien que les parcelles plantées en vigne puissent parfois accentuer le ruissellement.

Le Massif Central, les Landes, la Basse-Normandie, les pays de Loire et l'Est (Lorraine)

Ces régions ne sont pratiquement pas touchées par l'érosion (aléa très faible), soit du fait de l'occupation des sols (forêts, prairies), soit à cause des pentes faibles.

On remarque néanmoins quelques problèmes locaux :

- **L'Auvergne** : c'est une région montagneuse fortement boisée et herbagère, mise à part dans la plaine de la Limagne, où les cultures sont sur des terrains plats, n'occasionnant pratiquement pas de risques d'érosion.
- **La Basse-Normandie** : c'est une région principalement couverte de prairies et de zones agricoles hétérogènes, excepté la plaine de Caen, bien mise en cultures et qui peut être sensible à l'érosion localement au printemps et en automne-hiver, sur les terrains en pentes. On a recensé une trentaine de « coulées de boue » dans ce secteur, mais qui pourraient aussi être des inondations boueuses sans rapport avec l'érosion des terres agricoles.
- **Le Perche** : une petite zone à cheval sur la Basse-Normandie, la région Centre et les Pays de la Loire est sensible en automne-hiver, du fait de la battance des sols dans ce secteur. On y observe une érosion sans conséquence catastrophique dans les cultures, mais chronique et insidieuse. L'absence de « coulées de boue » déclarées dans ce secteur, peut s'expliquer du fait d'un parcellaire morcelé et du drainage des sols, qui limite efficacement le ruissellement et l'érosion.
- **Les pays de Loire** : ils sont faiblement concernés par l'érosion, mis à part deux types de problèmes :
 - Le long de la Loire à l'est, des « coulées de boue » prennent naissance sur les coteaux cultivés en vigne. Le facteur principal de déclenchement de l'érosion est ici la pente.
 - Le nord-est de la région connaît des problèmes d'érosion sur des sols sableux à forte détachabilité, sous l'effet de pluies intenses et sous orages (Dufour et al., 1990).

4.6 Validation des résultats

La modélisation des risques d'érosion en France est un travail de grande ampleur, et à ce titre nécessite des procédures strictes d'évaluation et de validation qui requerraient la mise en place d'un projet d'assez grande ampleur, associant des structures régionales.

Trois types de validations possibles sont développées ci-dessous : deux d'entre elles sont des comparaisons des résultats du modèle avec d'autres sources de données, et la troisième qui n'a pas encore été réalisée est une étude des erreurs intrinsèques au modèle.

Comparaison avec la cartographie des « coulées de boue »

La première confrontation possible des résultats peut être envisagée avec le fichier des catastrophes naturelles concernant les « coulées de boue ». Elle met en évidence les zones de désaccord ou au contraire fait apparaître les espaces à la fois potentiellement sensibles du modèle, et qui correspondent effectivement à des communes fortement touchées par les « coulées de boue ».

Différentes analyses statistiques ont été effectuées pour comparer les deux séries de données intégrées par PRA (classe d'aléa affectée par le modèle et densité de « coulées de boue »), sur les 15 dernières années.

Le coefficient de corrélation de Spearman (coefficient de rang) obtenu est de 0,219, ce qui montre qu'il existe un lien entre les 2 variables.

Le test de Kruskal et Wallis (test non paramétrique) permet d'estimer le lien entre un caractère qualitatif et un caractère quantitatif. Ce test met en évidence des différences hautement significatives entre d'une part le nombre de coulées et d'autre part les 5 classes d'aléas (le nombre de coulées, reclassé en 5 classes, diffère d'un aléa à un autre). L'aléa 1 (aléa faible) notamment, diffère significativement des autres niveaux d'aléa du point de vue du nombre de coulées déclarées (aléa faible, avec très peu ou pas du tout de coulées).

Cependant, comme nous l'avons vu précédemment⁴, la confrontation des résultats avec les cartes de « coulées de boue » ne constitue pas réellement une validation, car d'une part, l'érosion n'entraîne pas toujours de « coulées de boue » (même si celles-ci sont un témoin de l'érosion des sols) et d'autre part, cet inventaire des coulées est incomplet et très biaisé, notamment à cause de la définition imprécise de la « coulée de boue ».

Comparaisons avec une étude régionale : application à la Haute-Normandie (figure 18)

Une deuxième voie de validation du modèle est d'appliquer la méthode sur des **secteurs tests** où l'on connaît les informations de façons plus précises. Des régions comme le Nord-Pas-de-Calais, la Haute-Normandie ou le Languedoc-Roussillon disposent de telles informations. Le modèle a été appliqué à la région Haute-Normandie (Souadi et al., 2000), avec des données plus précises et donne des résultats satisfaisants. Les résultats de cette étude, que nous présentons ici succinctement, ont permis d'améliorer le modèle France.

Cette étude a permis d'adapter à l'échelle de la Haute-Normandie le modèle conçu à l'origine à l'échelle de la France. Dans ce changement d'échelle, nous pouvons distinguer deux étapes visant à améliorer le modèle : la première a consisté à réactualiser les données ou à améliorer leur résolution. La mise à jour de l'occupation du sol à partir d'images satellite, l'amélioration de la résolution du MNA (50 m au lieu de 250 m), mais aussi l'application de règles de pédo-transfert à la carte au 1 : 50 000^e des formations superficielles et géologiques sont à l'origine d'une estimation plus précise de la sensibilité des sols à l'érosion.

La seconde étape a consisté à **considérer un nouveau paramètre : la position du pixel dans le bassin versant**, information extraite du Modèle Numérique d'Altitude (MNA). Celle-ci permet de tenir compte du fonctionnement spatial très probable de l'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire :

⁴ voir la discussion sur les risques de « coulées de boues » d'origine agricole, § 3.2.

- érosion diffuse si le pixel se situe en amont du bassin versant ;
- érosion concentrée et ravinement si le pixel se situe en aval.

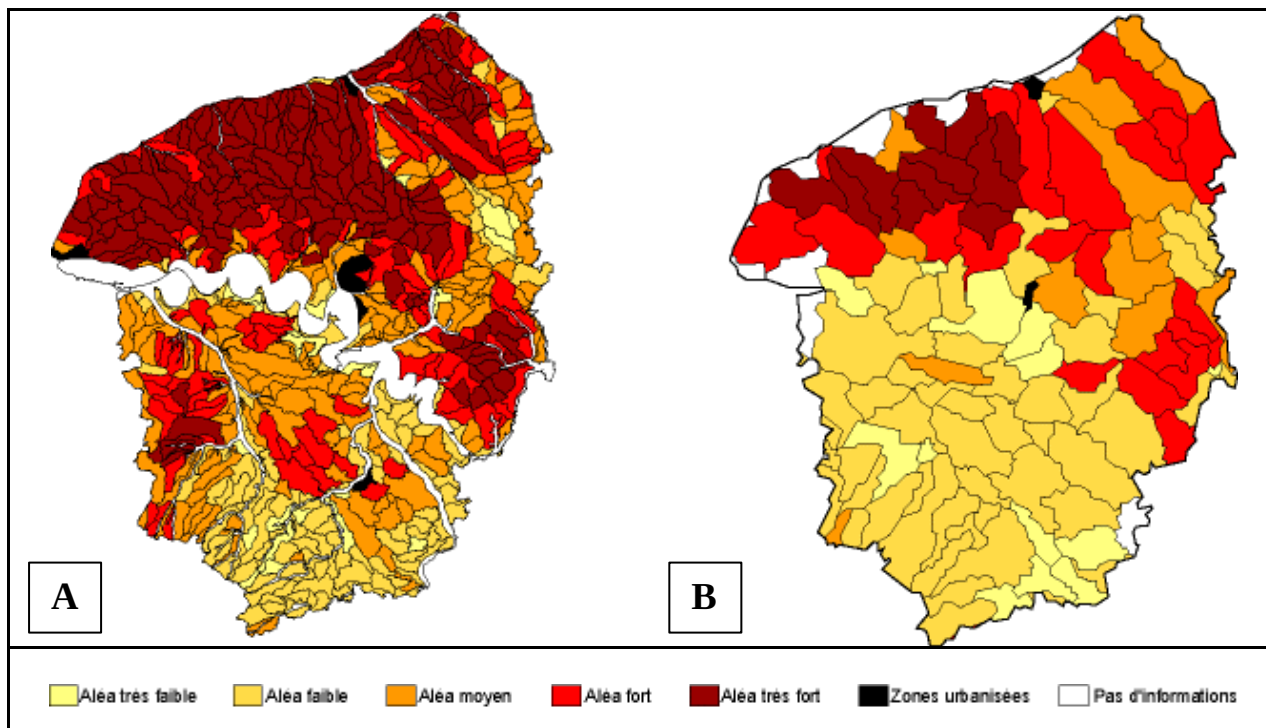


Figure 18 : comparaison des cartes issues des modèles appliqués à la Haute-Normandie.

A : Modèle Haute-Normandie ;

B : Modèle national (extrait) ;

Cartographie : INRA Orléans ; Kaléidos.

Etudes des erreurs intrinsèques du modèle

Afin de mettre en évidence les erreurs et imprécisions intrinsèques au modèle, un autre examen possible consisterait en une analyse de la propagation des erreurs au cours des différents traitements réalisés sous Système d'Information Géographique (SIG). Il s'agit d'estimer les incertitudes contenues dans chaque couche d'information, puis d'estimer leur cumul au sein du système expert. On peut distinguer les erreurs sémantiques et les erreurs géométriques. Une analyse de sensibilité du modèle serait alors un moyen de cerner les variables les plus importantes et de proposer des méthodes nouvelles d'acquisition de ces données. Cette analyse de sensibilité du modèle n'a pas pu être réalisée dans le cadre de la présente étude.

Conclusion sur la validation des résultats

Dans la nouvelle version du modèle de prévision des risques d'érosion en France présentée ici, nous avons essayé d'apporter des éléments de validation des résultats. Cette première validation reste insuffisante à ce stade du travail. En effet, la comparaison avec les « coulées boueuses » apporte des éléments de réponses, sans toutefois être parfaitement fiable du fait de l'imprécision de la donnée elle-même.

Cette donnée est cependant la seule dont nous disposons à l'échelle concernée. Afin d'améliorer la validation, le fichier des «coulées boueuses» a été remis à jour, ce qui améliore la fiabilité des résultats statistiques du nombre de coulées par communes.

A l'heure actuelle, il est donc nécessaire de se référer aux commentaires faits pour chaque région, lors de la lecture de la carte des risques.

4.6 Bilan et perspectives

La mise au point du modèle d'érosion des sols en France contribue à une meilleure connaissance de la localisation des risques d'érosion dans chaque région, mais elle comporte aussi un certain nombre de limites liées essentiellement à l'échelle du travail.

apports de la méthode mise au point :

L'originalité de la méthode mise au point lors de cette étude a permis de développer une cartographie présentant un certain nombre d'avantages :

- L'utilisation d'une démarche unique pour cartographier l'aléa érosion à l'échelle nationale permet des **comparaisons interrégionales** qui n'étaient pas possibles jusque-là.
- La prise en compte des différents types d'aléas dans le modèle permet de mieux rendre compte des différents phénomènes érosifs connus. De plus, la connaissance simultanée du **type d'aléa et de son intensité** pour chaque région agricole, permet une meilleure analyse des résultats.
- La mise au point d'une **cartographie saisonnière** permet de connaître l'importance de l'aléa au cours des différentes périodes de l'année. Il fait ressortir par exemple, un aléa plus fort en zone méditerranéenne en été et en automne, ou un aléa plus faible au printemps et en été pour la Bretagne. De plus, cette approche permet de tenir compte des types de cultures présentes en chaque saison. Par exemple, une forte concentration de cultures de printemps dans une région pluvieuse en cette saison, entraîne des risques forts.
- L'intégration de l'aléa selon différentes **unités spatiales d'intégration** permet d'adapter la cartographie aux besoins des utilisateurs.
- La souplesse du modèle permet de **remettre facilement à jour les données** périmées et offre la possibilité de **simuler** l'évolution des aléas pour des scénarios de changement climatique ou de changement dans l'occupation des sols.

Les difficultés rencontrées

Les limites de cette étude viennent principalement de la faible précision de certaines données de base.

- La faible précision de la carte pédologique au 1/1 000 000^e entraîne des évaluations assez grossières des sols à l'échelle d'un pixel de 250 m, et donc des estimations de la battance assez peu fiables dans la règle de pédo-transfert. Ceci est l'un des principaux points faibles de l'étude.
- Le pas du MNA à 250 m n'est parfois pas suffisant pour estimer correctement les pentes, comme nous l'avons vu dans l'application du modèle à la région Haute-Normandie.

- Les données de CORINE land cover et du RGA ne sont plus très récentes, bien qu'elles soient cohérentes entre elles (période 1988-1991).

Enfin, comme vu précédemment concernant la validation du modèle, la confrontation avec la carte des « coulées de boue » pose un certain nombre de problèmes du fait des données utilisées, mais aucune autre source de données n'est actuellement disponible à cette échelle.

De la synthèse nationale à la région et à l'Europe...

Le **zoom** effectué sur la région Haute-Normandie **en employant des données plus précises** (carte des sols et formations superficielles au 50 000^e, MNA au pas de 50 m) a permis d'adapter le modèle localement et d'obtenir une amélioration des résultats (cf. § 4.5.2).

Ces couches d'informations ne sont malheureusement pas encore disponibles sur la France entière, mais d'autres zooms pourraient être envisagés sur certaines régions, comme par exemple dans la région Picardie qui, sensibilisée aux problèmes érosifs rencontrés sur son territoire, a émis le souhait d'appliquer le modèle à son territoire de même que la Basse-Normandie, Midi-pyrénées ou PACA. Une application du modèle à l'échelle de l'Europe est actuellement en cours d'élaboration en collaboration avec le bureau européen des sols. La résolution de 1 km, actuellement la meilleure disponible sur l'ensemble de l'Europe, limite la qualité des résultats, mais on devrait rapidement disposer de données plus précises. Les résultats sont disponibles sur le site WEB du JRC d'Ispra (<http://pesera.jrc.it>).

Perspectives

A l'avenir, certaines incertitudes dans les résultats pourraient être levées par l'amélioration de la précision du modèle qui pourrait intégrer de nouveaux paramètres ou par une validation « terrain » des résultats ou encore par le développement de l'utilisation du modèle.

➤ Comment améliorer le modèle ?

- **Prendre en compte l'effet cumulé des précipitations** au cours des saisons sur la formation d'une croûte de battance et l'imbibition des sols ;
- **Réactualiser simultanément les données** anciennes du RGA de 1988 et de CORINE land cover (prévue pour fin 2003 - début 2004) ;
- **Intégrer les données du RGA dans le modèle** pour estimer les aléas en fonction du pourcentage de surface des PRA en cultures d'hiver et de printemps. On obtiendrait ainsi un aléa fort au printemps pour les PRA à forte proportion de cultures de printemps, soumises à de fortes précipitations, et ayant eu le temps de développer une croûte de battance ;
- **Intégrer de nouveaux paramètres** dans le modèle, comme la longueur des pentes, l'épaisseur des sols, la pierrosité des terrains ou la teneur en matière organique (figure 19). Pour cette dernière, la cartographie France entière des stocks de matière organique des sols (tirées de règles de pédo-transfert, Arrouays et al. ; 2001) est disponible, quoique peu précise.

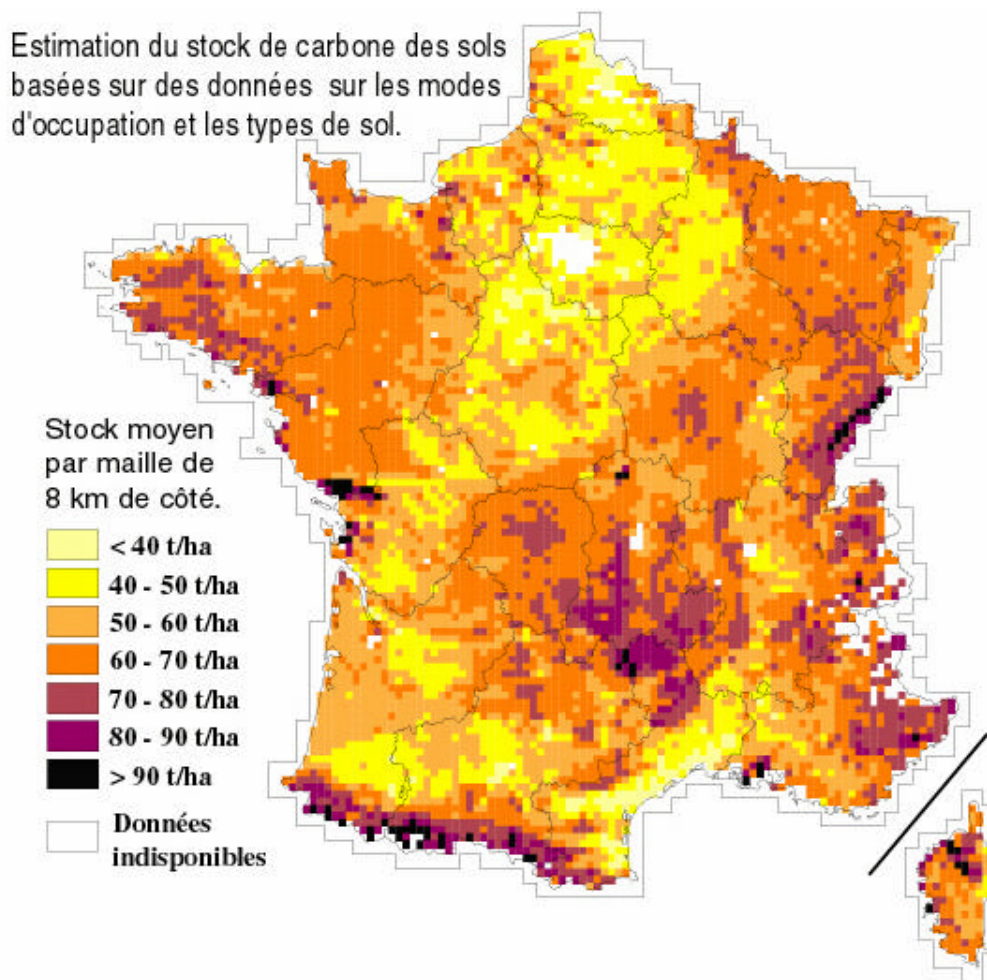


Figure 19 : Carte de l'estimation de la quantité de matière organique dans les sols ; Arrouays et al., 2001.

➤ Comment valider les résultats ?

- Réactualiser la base de données sur les « coulées de boue », en triant manuellement tous les dossiers de 1995 à 2001, afin d'homogénéiser la série historique, et mettre en place une procédure permanente de collecte de ces dossiers. Ceci permettrait d'améliorer la corrélation entre les « coulées boueuses » et les niveaux d'aléas donnés par le modèle. La validité de cette base de données est d'autant plus importante que les « coulées boueuses » sont la seule source disponible pour l'instant pour évaluer les dégâts de l'érosion des sols.
- Développer les validations et **confrontations avec d'autres sources de données**, qui restent à rassembler. Par exemple, les travaux de nettoyage de la voirie, effectués par les DDE, le suivi de l'augmentation de la turbidité de l'eau dans les rivières, effectué par les sociétés de pêche, ou encore le suivi de l'augmentation de la turbidité de l'eau dans les captages d'eau potable, effectués par les DDASS.
- Toute modélisation de phénomènes géographiques nécessite une confrontation avec des données de **terrain**. A l'échelle nationale, des vérifications pourraient être envisagées dans certaines PRA, notamment celles posant problème dans l'interprétation des aléas (zones peu connues des spécialistes ou n'étant touchées que récemment par l'érosion).

- **L'avis d'experts** dans chaque région permettrait d'apporter des compléments d'explications sur les phénomènes locaux. De plus, il mettrait certainement en lumière un certain nombre de risques sur ou sous-estimés par le modèle. L'implication d'experts régionaux dans la démarche de validation est d'autant plus nécessaire que le modèle a été appliqué à l'échelle régionale (en Haute-Normandie), et que d'autres régions pourraient aussi l'utiliser. Si tel était le cas, comme nous l'espérons, cette démarche devrait conduire à terme à la mise en place d'un **réseau de correspondants locaux**, impliqués dans la gestion et la prévision des risques d'érosion.
- L'analyse de la propagation des **erreurs intrinsèques au modèle** pourrait être réalisée, comme il a été développé au § 4.5.

➤ **Comment développer l'utilisation du modèle ?**

- On peut envisager, à partir des résultats obtenus, de faire des **simulations** sur l'influence de changements de climat ou d'occupation des sols.
- Généraliser l'usage régional du modèle : en effet, **l'application du modèle à d'autres échelles** (notamment régionale ou européenne) a permis d'en améliorer certaines règles de décision et de mettre en évidence l'influence majorée ou minorée de chaque couche d'information sur les résultats de la cartographie. L'application à d'autres régions qu la Haute-Normandie permettrait d'aller encore plus loin dans la compréhension des mécanismes érosifs.

MOYENS D'ACTION ET METHODES DE LUTTE CONTRE L'EROSION DES SOLS

Lorsqu'un événement catastrophique se produit différents types de mesure peuvent être engagés dans l'un des buts suivants :

- Indemniser ;
- Protéger ;
- Prévenir.

La première des mesures prises après un événement catastrophique ayant causé des dégâts importants est l'élaboration de dossiers « catastrophes naturelles », sous la responsabilité des maires, pour l'indemnisation des victimes.

Ensuite, afin d'éviter qu'un tel événement ne se reproduise, la commune se tourne vers le Conseil général, la Direction départementale de l'Équipement ou celle de l'Agriculture et de la Forêt pour obtenir un appui technique et surtout financier en vue de réaliser des aménagements de protection. Il s'agit en général des bassins de retenue et de décantation qui constituent une "protection rapprochée" des zones urbanisées, ou plus généralement des zones vulnérables.

Le bassin de retenue stocke une partie du ruissellement. On parle de bassin écrêteur, de laminage ou d'orage quand on s'attache au rôle d'écrêtement du débit : les eaux sont retenues puis évacuées à faible débit. Les bassins de décantation ou sédimentation ont pour rôle prioritaire la sédimentation de la terre transportée.

Ces bassins de retenue sont souvent indispensables lorsque les réseaux d'eau pluviale enterrés des agglomérations ne peuvent être modifiés. Ils présentent néanmoins des inconvénients :

- leurs coûts d'entretien, principalement leur curage, sont importants (environ 10% de l'investissement total par an),
- ils ne font pas clairement prendre conscience de leurs responsabilité aux acteurs du paysage en amont,
- Ils peuvent développer, en aval, un sentiment de sécurité excessif chez les habitants, donc favoriser une 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.

Cette « protection rapprochée » des zones vulnérables s'avère être très rapidement une réponse coûteuse et insuffisante.

De plus, dans certains départements où les budgets consacrés par le Conseil Général à la construction de telles retenues ne cessaient de croître, le caractère inévitable des « coulées boueuses » a été mis en doute. La recherche d'une plus grande efficacité conduit alors à prendre le problème à son origine et à s'intéresser à des mesures portant sur le ruissellement et l'érosion plus en amont des zones urbanisées (diagnostics) ou à tenter de réduire l'impact de l'érosion en tenant compte du risque qu'il constitue dans les documents d'urbanisme.

5.1 Aménagements collectifs en amont des zones à risques

L'évolution actuelle du paysage se traduit souvent par la disparition d'éléments qui jouent un rôle important dans le stockage des eaux de ruissellement et dans leur infiltration, qu'il s'agisse de régions de grandes cultures ou de vignobles de coteau. La construction de bassins de retenue à proximité des zones à protéger, première réponse apportée à un problème de « coulées boueuses », doit être complétée par des actions visant à reconstituer les éléments du paysage ayant une fonction hydraulique.

Si la disparition des éléments du paysage résulte le plus souvent d'une série de décisions individuelles parfois très dispersées dans le temps, leur restauration n'est en revanche possible que lorsqu'elle est assurée par une maîtrise d'ouvrage collective. Celle-ci permet alors de penser le projet à l'échelle d'un bassin versant, d'assurer l'indispensable cohérence hydraulique des aménagements prévus, et de faciliter l'entretien ultérieur des ouvrages.

S'ils ne s'insèrent pas dans un schéma global d'évacuation des eaux, ou s'ils sont l'objet d'un défaut de conception, de réalisation, ou d'entretien, les aménagements, dont la fonction est généralement de concentrer les écoulements, peuvent provoquer des dégâts très importants, voire aggraver ou déplacer les risques.

Les communes ont d'ailleurs la possibilité d'empêcher la réalisation de tels aménagements en ayant recours au code civil (article 640 et suivants) ou au code rural (article 175) : selon la loi, le propriétaire ne doit pas aggraver les écoulements naturels traversant son terrain.

Différentes solutions peuvent être mise en œuvre collectivement pour maintenir ou recréer les éléments du paysage dont la disparition contribue à l'apparition de « coulées de boue ».

Types d'aménagements

➤ Structures favorisant l'infiltration de l'eau et assurant le laminage des débit de crues

- **les mares** : leur capacité de stockage est de l'ordre de quelques centaines de m³. Pour un bon fonctionnement, elles doivent conserver un niveau de marnage suffisant (au moins 1 m) et être curées pour éviter le comblement par les sédiments décantés. Leur positionnement doit tenir compte des risques d'infiltration vers les nappes souterraines (risques de pollution azotée et de pollution par les matières en suspension) ;
- **les retenues** (photographie 16) : disséminées dans le bassin versant elles ont non seulement une fonction de réduction des crues, mais protègent également les talwegs situés en aval contre l'incision en réduisant le débit des écoulements exceptionnels ;



Photographie 16 : bassin de rétention des sédiments dans le vignoble champenois ; Y. Le Bissonnais .

- **les haies**, les talus et les murets ;
 - **les prairies permanentes** en fond de talweg et les bandes enherbées. Cette technique, également employée à titre individuel, sera décrite ultérieurement.
- **Structures permettant l'évacuation sans dégât des eaux**
- **les bandes enherbées** déjà citées ;
 - **les fossés** : ils permettent de canaliser le ruissellement et de le stocker, mais en même temps ils présentent un risque d'accélération du ruissellement. Ils constituent un obstacle infranchissable par les engins agricoles, contrairement aux bandes enherbées qui peuvent être traversées, à condition de relever les outils.
- **Autres techniques d'aménagement**

Le maintien ou la recréation de structures paysagères peut s'avérer insuffisant. Il est alors nécessaire, surtout en vignoble de coteaux, de faire appel à d'autres techniques d'aménagement :

- **les passages busés** : ils permettent le franchissement de la voirie. Ils doivent être associés à un fossé de collecte en amont et, en aval, être prolongés par une bande enherbée pour éviter tout ravinement ;

- **les collecteurs enterrés** : pour les pentes inférieures à 3%, diverses précautions doivent être prises : diamètre de la canalisation suffisant, installation d'un dépieur à l'amont. Plus coûteux que le fossé, cet aménagement a l'avantage de ne pas constituer un obstacle à la circulation des engins. Cependant, il risque d'aggraver le problème plus en aval ;
- **les avaloirs** : sous forme de grille dans les chemins ou d'avaloirs latéraux, ils récupèrent les eaux mais aussi tous les corps entraînés par les flots provenant du territoire agricole. Ils doivent donc être régulièrement entretenus ;
- **les canalisations à ciel ouvert** : c'est sans doute la solution la plus efficace pour évacuer les eaux de ruissellement. De plus, leur entretien est aisé ;
- **les chaussées aménagées** pour faciliter les écoulements : utilisées en vignobles, elles collectent et évacuent les eaux, tout en permettant la circulation des engins agricoles. Leurs formes sont diverses: profil en V, trapézoïdal ou en contre pente. Ces chaussées accélèrent l'évacuation du ruissellement et peuvent de ce fait augmenter les risques d'inondation en aval.

Conditions de mise en oeuvre

➤ Maîtrise d'ouvrage collective

Diverses structures peuvent être maîtres d'ouvrage pour de tels aménagements :

- **Communes ou syndicats de communes** (Syndicat à vocation unique, Syndicat intercommunal à vocations multiples), reposant sur la responsabilité des maires en matière d'urbanisme ;
- **Associations Syndicales Autorisées (ASA)**, constituées par le regroupement de propriétaires, ce qui se traduit par une plus grande implication des agriculteurs dans les aménagements. Cependant, leur mise en place requiert un consensus difficile à obtenir lorsque la zone concernée est grande : il est en effet nécessaire de réunir l'accord des 2/3 des propriétaires représentant au minimum la moitié de la surface concernée par les travaux ou de la moitié des propriétaires représentant au minimum les 2/3 de cette surface.
- **Associations Foncières de Remembrement (AFR)**, quand ces aménagements sont réalisés à la suite d'un remembrement. Ces associations permettent de dégager l'emprise nécessaire à la réalisation des ouvrages, par prélèvement sur l'ensemble des propriétaires. Le remembrement est, cependant, peu utilisé dans le vignoble. Ainsi, le Conseil Général de Saône-et-Loire a, la plupart du temps, rejeté cette formule en raison de la valeur vénale importante des terres dans les vignobles, de taux de subvention trop élevés et du risque de favoriser la suppression d'obstacles au ruissellement.

➤ Maîtrise du foncier

La question de la maîtrise du foncier nécessaire pour réaliser les aménagements collectifs est d'autant plus délicate que, comme nous le verrons plus loin, il s'agit souvent d'aménagements linéaires. De ce fait, le remembrement est une occasion pour la collectivité (commune ou AFR) d'acquérir les emprises nécessaires à la réalisation d'un aménagement cohérent.

➤ **Financements**

En règle générale, le financement des aménagements collectifs est réparti entre les collectivités locales (commune, Conseil général) avec une participation directe des propriétaires concernés dans le cas des AFR et des ASA.

Les collectivités peuvent aussi bénéficier d'aides du Fonds de gestion de l'Espace rural (FGER) dont la mise en oeuvre est organisée par la circulaire du Ministère de l'Agriculture du 6 avril 1995.

Ainsi, le FGER a pour mission «de soutenir, en leur apportant une contribution financière, des actions concourant à l'entretien et à la réhabilitation (...) d'éléments naturels du paysage rural, notamment dans un but de conservation de la diversité biologique et d'espaces où l'insuffisance d'entretien est susceptible de provoquer des risques naturels ». Par ailleurs, cette circulaire précise que « Le fonds contribuera ainsi, par exemple, (...) à la revégétalisation par un couvert herbacé de zones sensibles à l'érosion ».

Cependant, un peu plus loin, la même circulaire précise que « le fonds n'a pas vocation à prendre en charge (...) la prévention des risques d'inondation ne découlant pas d'une absence d'entretien de l'espace agricole ou forestier ». Le FGER a pour objectif général de donner les moyens pour entretenir ou réhabiliter des espaces insuffisamment entretenus. Suivant la définition donnée à cette notion d'entretien, son utilisation dans des régions de grandes cultures pour reconstituer des structures du paysage en vue de maîtriser l'érosion des sols est plus ou moins conforme à ses objectifs.

5.2 Mesures individuelles de lutte contre les effets de l'érosion

Ainsi qu'il l'a été évoqué ci-avant, une maîtrise d'ouvrage publique assure la cohérence hydraulique des aménagements et garantit leur bon entretien. Cependant, les agriculteurs peuvent, à titre individuel :

- réaliser de petits aménagements complémentaires en vue d'améliorer le fonctionnement hydraulique d'un bassin versant ;
- mettre en oeuvre des variantes en matière de pratiques agricoles qui participent au même objectif.

Régions de grandes cultures

➤ **Petits aménagements en région de grandes cultures**

- Traitement des talwegs : les techniques employées, dont certaines ont déjà été évoquées dans les mesures collectives, augmentent la résistance du sol à l'incision et participent à la réduction des débits de crue. Les études réalisées par le CEMAGREF permettent de disposer de références pour ce type d'aménagement ;
- Bande enherbée (photographie 17) : elle freine le ruissellement et augmente la résistance du sol à l'incision. Il est important de ne pas orienter la raie de charrue ou le travail du sol de façon parallèle à la bande mise en place. Lorsque les pentes des versants sont très faibles, il faut profiler la bande enherbée pour que le rehaussement du sol lié aux dépôts ne compromette pas son efficacité. Cependant, face aux problèmes que peut poser son envasement, une autre réponse consiste à en augmenter la largeur, ce qui consomme

davantage de surface mais réduit les frais d'installation et ceux d'entretien. Son utilisation est en expansion compte tenu des aides accordées dans le cadre des mesures agri-environnementales ;



Photographie 17 : Bande enherbée canalisant et freinant le ruissellement entre des parcelles et une route bordée d'habitations. (Bassin de l'Andelle, département de l'Eure); Y.Nedelec.

- Fossés : parfois enherbés ou empierrés, ils peuvent relayer la bande enherbée lorsque celle-ci n'est plus suffisante pour acheminer des quantités d'eau importantes. Ils présentent l'inconvénient de ne pas être franchissables par les engins agricoles et de demander des curages fréquents. Il faut également que le travail du sol soit réalisé parallèlement au fossé pour éviter la création d'une fourrière* risquant de s'inciser ;
- Barrages en balles de paille ou fascines (photographie 18), placés en bordure de route ou sur une limite de parcelle, permettent de créer de petites retenues. Ils ont un caractère provisoire (pourrissement de la paille en 3 ans). Les ballots de paille sont alignés perpendiculairement à la pente et ancrés dans le sol. Ce barrage ralentit le flux d'eau, le filtre et le stocke temporairement, protégeant ainsi l'aval. La perméabilité des ballots de paille permet la vidange progressive de la retenue après un orage ; si besoin, la durée de la submersion peut être réduite en enlevant un ou deux ballots ;



Photographie 18 : Diguette en paille en travers de talweg, vue de l'extrémité de l'ouvrage depuis l'amont (Bassin de l'Andelle, département de l'Eure); Y.Nedelec.

- L'aménagement du modelé des parcelles cultivées, afin de diminuer leur pente, réduit la vitesse d'écoulement du ruissellement et donc sa force tractrice. Ces aménagements peuvent être de simples « ondulations » réalisées avec une charrue ou de véritables terrasses pour les pentes plus importantes. Dans ce cas, l'évacuation des eaux est assurée par des drains ou par des chenaux enherbés.
- Plis : ils sont installés en travers du talweg pour réduire le ruissellement. Une retenue recueille et stocke temporairement les eaux. Le trop-plein éventuel est évacué par débordement, tandis que des buses permettent une vidange assez rapide de l'ouvrage. Ces ouvrages sont placés en limite de parcelle. L'agriculteur peut rouler sur le pli, qui ne gêne pas les travaux agricoles. Cet aménagement efficace a aussi le mérite de montrer que le ruissellement à l'aval d'une parcelle n'est pas inéluctable.

➤ **Mesures agronomiques en région de grandes cultures**

Pour réduire le ruissellement, des techniques agricoles favorisant l'infiltration dans le sol et lui conférant une bonne rugosité, peuvent être mises en oeuvre. Cependant, dans la majorité des cas, l'amélioration des pratiques culturales ne suffit pas pour résoudre le problème et elle doit être complétée par des aménagements hydrauliques restructurant le paysage.

- Orages sur cultures de printemps : pour limiter le ruissellement dû à un orage de printemps, on dispose de peu de moyens. Il faut surtout intervenir sur la capacité de rétention de l'eau en

surface. La période des semis étant la plus sensible, on peut réaliser des semis plus motteux, mais cela n'est pas toujours suffisant, surtout sur les coteaux. Malheureusement, les références techniques françaises sont rares dans ce domaine et les références disponibles ont été mises au point aux États-Unis ou en Allemagne (techniques associant une culture protectrice à la culture de printemps, sur toute la surface ou en bandes, création d'un mulch*, culture sans labour...). Leur adaptation aux conditions spécifiques des régions française reste encore à faire.

- Intercultures sur limons battants : les techniques culturales jouent un rôle important dans l'amélioration de l'infiltration et de la rétention d'eau superficielle sur les terres battantes. L'amélioration de l'infiltrabilité et de la rugosité de surfaces non emblavées en hiver peut être obtenue par un travail du sol minimum, grossier et profond. De même, un engrais vert freine la formation d'une croûte de battance s'il est implanté suffisamment tôt pour protéger le sol par son couvert (semis d'août après céréales d'hiver, par exemple).

L'engrais vert a aussi un impact sur l'érosion du fait :

- des racines qui aèrent le sol et assurent l'ancrage de celui-ci ;
- de la décomposition finale de la masse végétale qui améliore la stabilité structurale du sol.

- déchaumages : ils sont réalisés de façon à donner des surfaces rugueuses qui augmentent la capacité d'infiltration* et de stockage du sol et retardent ainsi l'apparition du ruissellement.

Certaines pratiques culturales ne concernent qu'une partie de la parcelle : ce sont celles qui ont pour objectif d'améliorer la résistance des micro-talwegs. Leur effet est donc comparable à celui d'une bande enherbée.

- La bande tassée, par exemple, est un aménagement temporaire, facile à réaliser quelle que soit la disposition du talweg par rapport au parcellaire. Elle limite l'érosion du talweg en améliorant sa résistance à l'incision. Cette technique doit s'appliquer après le semis. Cependant, le compactage n'est à préconiser que dans la partie amont du bassin versant, tant que les surfaces drainées restent limitées. De façon similaire, le non-travail du sol des micro-talwegs leur permet de mieux résister à l'incision en période hivernale.
- La disposition judicieuse des cultures le long d'un même versant permet également de diminuer le risque érosif. Par exemple, il convient d'éviter les situations dans lesquelles des surfaces potentiellement ruisselantes sont situées en amont de surfaces ameublées. Une telle affectation est facile à mettre en œuvre pour les parcelles d'une même exploitation agricole, elle est plus difficile à réaliser sur l'ensemble d'un bassin versant cultivé par plusieurs agriculteurs. Elle est cependant envisageable dans le cadre d'une structure telle une A.S.A. qui facilite la concertation entre agriculteurs.

Région de vignoble

➤ Petits aménagements en région de vignoble

Les petits aménagements topographiques et hydrauliques étaient traditionnellement très présents dans le vignoble et permettaient une canalisation des eaux de ruissellement (photographie 19).

L'aménagement des parcelles en terrasses (photographies 20 et 21) permet une conduite mécanisée de la vigne et la maîtrise du ruissellement et de l'érosion. Toutefois, c'est un aménagement lourd à réaliser et à entretenir, et qui se heurte souvent à des contraintes foncières fortes. Il en est de même pour les aménagements de banquettes. Elles comportent chacune, de l'amont vers l'aval, un talus, un fossé et un bourrelet.



Photographie 19 : rigole de drainage dans le vignoble de Banyuls ; C. Cudennec.



Photographie 20 : vignoble aménagé en terrasses (Bouches du Rhône); C. Bardet.



Photographie 21 : réseau de drainage dans le vignoble de Banyuls ; C. Cudennec.

En milieu de parcelle, les eaux peuvent être interceptées avant qu'elles ne se concentrent suffisamment pour inciser rigoles et ravines, grâce à un réseau de drainage. En bas de parcelle, des remblais filtrants ou des murets de retenue retiennent la terre entraînée par le ruissellement.

➤ Mesures agronomiques en région de vignoble

Parmi les principales mesures agronomiques utilisables en région de vignoble, on retiendra essentiellement celles décrites dans le document de Litzler, 1988 :

- L'enherbement des inter-rangs (photographie 22) est une pratique culturale qui s'est développée ces dernières années. L'ancrage du sol par le système racinaire augmente sa résistance à l'arrachement par le ruissellement. Par ailleurs, le couvert protège les sols à faible

stabilité structurale contre la battance et empêche la mise en mouvement de particules par effet splash (rôle d'écran protecteur). Enfin, il s'oppose à la concentration du ruissellement (division des flux) et augmente l'infiltration, déjà améliorée par le développement racinaire.



Photographie 22 : enherbement des inter-rangs dans le vignoble de Savoie ; Y. Le Bissonnais

L'enherbement peut être total ou partiel : dans les inter-rangs destinés au passage du tracteur il améliore la portance du sol. Il peut aussi n'être que temporaire afin que la vigne ne soit pas concurrencée pour l'eau ou pour réduire les risques de gelées.

- Apport de matériaux en surface : le rôle de ces apports qui constituent une couverture sur le sol est proche de celui de l'enherbement. Ils favorisent, en effet, la dissipation de l'énergie des gouttes de pluie, augmentent l'infiltration de l'eau et limitent la vitesse du ruissellement comme le départ des particules de terre. Pour rester efficaces, ces apports sont à renouveler régulièrement. Cette technique est cependant de peu de secours pour maîtriser l'érosion par concentration du ruissellement en cas d'orage très violent, surtout en bas de parcelle ou de versant.

Plusieurs matériaux sont utilisables : composts d'ordures ménagères, pailles, écorces. Le choix s'effectue en fonction des ressources locales disponibles et d'impacts tels ceux sur le réchauffement du sol, le risque de gelées printanières, l'apport d'azote lors de la minéralisation de la matière organique, le risque de développement de parasites et le risque de pollution des sols par les métaux lourds.

Recul des plantations par rapport aux voies : il s'agit de laisser un espace entre les plantations et les voies d'accès. En Saône-et-Loire, par exemple, une charte préconise que les plantations dans le sens de la pente doivent être réalisées à une distance de 4 m par rapport à l'emprise des voies de circulation.

Le soutien public aux mesures individuelles

➤ Les aides publiques

Les aides publiques favorisent le développement d'aménagements individuels anti-érosifs ou de pratiques agricoles innovantes. Ces mesures n'apparaissent pas toujours rentables à court terme pour l'agriculteur lui-même, mais elles ont un impact bénéfique pour l'aval.

L'aide publique revêt plusieurs formes : ainsi, la commune et le département peuvent subventionner des aménagements réalisés individuellement par des agriculteurs. Il peut s'agir d'aménagements destinés spécifiquement à réduire le ruissellement (tels que les diguettes ou les petites retenues) ou de réalisations participant à plusieurs objectifs, tels que la création de haies.

La collectivité peut aussi produire et diffuser des références techniques concernant les petits aménagements et surtout les pratiques agricoles réduisant le ruissellement ou l'érosion.

➤ Les CTE : contrats territoriaux d'exploitation

Le Contrat territorial d'exploitation est un contrat de 5 ans, le plus souvent individuel (plus rarement collectif), en principe cohérent avec les dispositions environnementales de la Politique Agricole Commune (PAC) passée pour une période de 5 ans, entre un exploitant agricole et l'Etat. Un peu moins de 30 600 CTE étaient signés en juillet 2002. En contrepartie d'aides financières versées par l'Etat, l'agriculteur s'engage sur des objectifs économiques et environnementaux. Sur la base d'un diagnostic de son exploitation, l'agriculteur définit un projet global d'exploitation sur 5 ans qui détaille les actions et les objectifs. Ce projet comprend un volet consacré aux engagements de l'exploitant dans le domaine de l'aménagement, du développement de l'espace rural et de l'environnement. Les cahiers des charges des CTE peuvent comporter de nombreuses mesures permettant de réduire les problèmes liés à l'érosion. Parmi celles-ci :

- la réhabilitation ou création et entretien des fossés, mares et haies ;
- la diminution des surfaces de sols nus en hiver : introduction d'une culture intermédiaire en période de risque (pluies d'automne par exemple) ;
- la modification des pratiques agricoles : remplacement des cultures de printemps par des cultures d'hiver ;
- la réhabilitation puis entretien des murets et terrasses ;
- la division des parcelles en culture arable par l'implantation d'une bande enherbée dans le but de ralentir les ruissellements ;
- la mise en place d'éléments structurants dans le sol pour limiter la battance ; épandage d'écorces sur les inter-rangs de vignes ;
- la reconversion des terres arables en prairies ;
- etc.

➤ La production de références et leur diffusion

La production de références, consiste en la mise au point de pratiques agricoles nouvelles permettant de remédier, notamment, aux problèmes d'érosion. Ces actions sont de la responsabilité des Chambres d'Agriculture ou sont prises en charge par les services techniques d'organismes interprofessionnels qui se chargent également de leur diffusion auprès des agriculteurs. Elles doivent s'inscrire dans la durée car la diffusion de pratiques agricoles innovantes peut nécessiter de 5 à 20 ans. Ces techniques après avoir été expérimentées doivent

être adaptées aux conditions locales ; ce qui requiert une bonne connaissance des terroirs et exige une approche globale des questions agronomiques. Une des difficultés consiste notamment à mobiliser les agriculteurs situés à l'amont des zones de « coulées boueuses ».

Des opérations pilotes ont été mises en place dans les années 80, pour permettre en particulier l'acquisition et la diffusion de références techniques en zones de grandes cultures (Pas-de-Calais, Seine-Maritime et Haute-Garonne). Ces opérations ont permis de mobiliser divers financements publics pour atteindre ces objectifs.

La présence d'une structure relais effectuant la synthèse des différentes études techniques menées localement et faisant émerger des besoins d'actions communes entre les utilisateurs d'un même espace semble aujourd'hui un point clef pour la mise en place d'actions globales associant des mesures agronomiques et hydrauliques.

➤ **Sensibilisation et formation**

La sensibilisation est organisée à l'échelon local. La publication de documents à l'occasion de manifestations nationales, régionales ou locales (salons, congrès, foires...) permet de faire le lien entre l'érosion, les dégâts observables à la parcelle, les « coulées boueuses » et la pollution des cours d'eau et des nappes. Les médias (presse écrite, télévision régionale, etc.) peuvent également être conviés à ces rencontres afin que l'information soit la plus large possible.

La mise en place d'une charte, comme celle des zones sensibles à l'érosion en Saône-et-Loire, est un exemple de sensibilisation des agriculteurs. Signée entre le Conseil général et la Chambre d'Agriculture dans ce cas précis, c'est un code de bonne conduite qui rappelle les règlements du code rural favorables à la lutte contre l'érosion et donne des recommandations. Elle est diffusée au niveau de chaque commune viticole et animée par les conseillers locaux.

5.3 Les mesures administratives de lutte contre les effets de l'érosion

Le code de l'urbanisme et les plans de prévention des risques (PPR)

Une première façon de réduire les risques liés à l'érosion consiste à empêcher l'urbanisation des zones exposées aux « coulées boueuses ». Cette mesure passe par la mise en oeuvre d'outils juridiques.

➤ **Le code de l'urbanisme**

Le code de l'urbanisme prévoit la réalisation de documents fixant les conditions d'affectation et d'utilisation des sols pour le territoire d'une commune. Il a été récemment modifié par la loi n° 2000-1208, dite « loi SRU ». (Loi relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbain), du 13 décembre 2000. Les PLU (Plans Locaux d'Urbanisme) remplacent aujourd'hui les POS. (Plans d'Occupation des Sols). Ils présentent le projet urbain des communes en matière d'aménagement, de traitement de l'espace public, de paysage et d'environnement. A ce titre ils doivent intégrer comme les POS, les données sur les risques naturels. Ils permettent par conséquent d'éviter l'urbanisation de zones à risques tels que certains bas de versants ou talwegs, en les classant non constructibles. Les PLU, soumis à enquête publique avant approbation doivent être compatibles avec les SCOT (Schéma de COhérence Territoriale) qui succèdent aux Schémas Directeurs, de portée territoriale plus large, définissant les grandes lignes de l'évolution des agglomérations.

Les petites communes ne possédant pas de PLU doivent dresser une carte communale organisant leur évolution en matière d'urbanisme.

Le code de l'urbanisme à travers les PLU rappelle les droits et les obligations à respecter en matière de préservation de la voirie départementale, communale et des chemins ruraux, de modifications de l'écoulement « naturel » des eaux, ou d'autorisations de défrichement, en faisant référence au Code Civil, au Code Forestier, à celui des Communes et, pour les coupes d'arbres, au Code de l'Urbanisme. Les documents d'urbanisme doivent aussi prendre en compte les directives définies dans le cadre de la loi paysage (Loi 93-24 du 8 janvier 1993), et peuvent ainsi assurer la protection d'éléments du paysage tels que les haies, les réseaux de haies, les bois ou les arbres.

La réalisation et la révision des documents d'urbanisme (SCOT et PLU) fournissent l'occasion de mener une réflexion globale sur le territoire communal, en concertation avec les différents acteurs intéressés, comme l'Etat, la Région, le Département, les Chambres d'Agriculture, les communes voisines, les associations, etc. L'objectif est d'harmoniser les différents intérêts et d'équilibrer aménagements et protection contre les risques naturels. Les documents d'urbanisme cités ci-dessus sont établis, si nécessaire, à partir de documents portant plus spécifiquement sur les risques (Plan de Prévention des Risques) et qui doivent en principe leur être annexés.

➤ **Les plans de prévention des risques (PPR)**

La loi 95-101 du 2 février 1995 a instauré les Plans de Prévention des Risques (PPR) et abrogé les PR (périmètre de risque, article R 111-3 du code de l'urbanisme) et les PER (Plans d'Exposition aux Risques naturels prévisibles). Les PER créés par la loi 82-600 du 13 Juillet 1982, relative à l'indemnisation des victimes de « catastrophes naturelles », déterminaient, à l'échelle de la parcelle, des zones exposées à un risque d'inondation, d'avalanche, de séisme, ou de mouvement de terrains, et précisaient également les techniques de prévention à mettre en oeuvre tant par les collectivités publiques que par les propriétaires privés. Une fois approuvé, un tel plan constituait une servitude d'utilité publique, cependant, les PER n'ont jamais été utilisés pour prévenir un risque de « coulées de boue ».

Les PPR sont des plans plus souples, plus adaptés pour la prise en compte de risques majeurs tels que, par exemple, les glissements de terrain, les chutes de blocs, les inondations de rivière ou les laves torrentielles. Moins contraignant que les PER, ils sont également établis à une échelle moins précise (1/25 000) que ceux-ci. Ils pourraient être utilisables pour prendre en compte les « coulées de boues ». Leurs principales caractéristiques sont :

- prescription à l'initiative des préfets de département qui doivent l'approuver (responsabilité de l'Etat);
- utilisation d'une approche par bassins de risques : plan communal, intercommunal ou infra communal ;
- possibilité d'interventions plus larges, en particulier dans les zones non exposées directement aux risques. Par exemple : aménagements à l'amont pour réduire les risques à l'aval ;
- structuration en niveaux croissants de complexité pour alléger la procédure de mise en place : un premier niveau de recherche peut inventorier les informations déjà existantes sur les

risques à traiter en priorité, une amélioration pouvant être apportée plus tard pour détailler les phénomènes ;

- réalisation de plusieurs documents correspondant à chaque niveau d'information :
 - cartes informatives des risques naturels portant sur les phénomènes les plus importants ;
 - cartes des aléas localisant et évaluant l'intensité des phénomènes, transmises aux élus pour être prises en compte dans les SCOT et PLU ;
 - cartes des enjeux portant sur l'évaluation du danger et la classification des bâtiments.

La prévention dans le cadre des contrats de rivière et des SAGE

➤ Les contrats de rivière

Depuis le 5 février 1981, les contrats de rivière visent à une amélioration de la qualité des eaux et à une mise en valeur de la rivière. Ils ne font pas appel à la voie réglementaire mais contractuelle et sont signés entre le ou les départements ou régions concernés et le ministre de l'environnement. Ils fixent des objectifs collectifs qui peuvent intégrer des mesures anti-érosives au sein du bassin versant. Le cas échéant, la procédure doit être intégrée au S.A.G.E. établi sur le périmètre, dont il est alors la traduction opérationnelle. Le ministère chargé de l'Environnement apporte des subventions dont le taux varie de 10 à 40% (circulaire du 24 Octobre 1994).

Exemples de contrats de rivière comportant un projet anti-érosion : Canche, Sensée, Aa, Wimereux, Lawe, Authie, Hem, Somme amont, Oise amont.

➤ SAGE : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux

Les SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux), institués par l'article 5 de la loi n° 92-3 du 3 Janvier 1992, fixent les objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur et de protection quantitative et qualitative des ressources en eau superficielle et souterraine et des écosystèmes aquatiques ainsi que de préservation des zones humides.

L'intérêt de ces SAGE est qu'il s'agit d'une approche globale et concertée, à l'échelle du bassin versant, qui intègre la protection et les usages économiques. Il fait l'objet d'un arrêté préfectoral et ses orientations ont une portée réglementaire.

La maîtrise de l'érosion des sols cultivés peut faire partie des objectifs d'un SAGE ou d'un contrat de rivière, avec comme souci la réduction de la turbidité des eaux superficielles et de leur eutrophisation liée aux pollutions diffuses d'origine agricole.

La prévention dans le cadre du remembrement

Le remembrement a largement participé à la disparition de structures paysagères importantes pour la qualité du paysage, que ce soit du point de vue visuel ou de son fonctionnement hydraulique : arrachage de haies, drainage des parcelles, recalibrage des fossés et des cours d'eau, etc. Il reste cependant, aujourd'hui, le principal mode d'aménagement rural incluant de nombreux aspects : urbanisme, tourisme, protection du patrimoine architectural et environnement et à ce titre peut s'avérer un outil efficace de lutte contre les effets de l'érosion.

➤ Vers une meilleure prise en compte des problèmes d'érosion

Le remembrement est une opération administrative, imposée aux propriétaires, qui consiste à redistribuer des terres afin de regrouper des parcelles. D'après l'article L 123-1 du Code rural, l'objectif du remembrement est « d'améliorer l'exploitation agricole des biens qui y sont soumis par la constitution d'exploitations rurales d'un seul tenant ou à grandes parcelles bien groupées » Il doit également avoir pour objet « l'aménagement rural du périmètre dans lequel il est mis en oeuvre ».

Une opération de remembrement peut être, par exemple, déclenchée à l'initiative des préfets des départements lors de grands travaux impliquant d'importantes modifications foncières (article L. 123-24 du Code rural) : routes, voies de chemin de fer, canaux d'irrigation. La plupart du temps cela nécessite des travaux d'aménagement tels que la construction de chemins, ou la reconfiguration de réseaux de drainage ou d'irrigation, etc.

Transfert forcé de terrains, la procédure de remembrement fait aujourd'hui appel à une plus large concertation, mettant en oeuvre des groupes de travail et commissions communale ou intercommunale qui permettent de préparer un projet collectif. Cette procédure qui modifie à l'environnement donne lieu à une enquête et une déclaration d'utilité publique. Elle peut être l'occasion de mettre en oeuvre des mesures de lutte contre l'érosion.

Un certain nombre de textes récents ont modifié la conception générale et les modalités de réalisation du remembrement, en vue d'une meilleure prise en compte du paysage, dans les deux sens du mot (aspects visuels ou esthétiques et aspects hydrauliques).

La loi du 1^{er} février 1995 sur la modernisation de l'agriculture et le décret n° 95-88 du 27 janvier 1995 adaptant certaines dispositions du livre 1^{er} nouveau du Code rural ont amélioré, d'un point de vue de la prise en compte de l'environnement, la procédure de remembrement. Elles intègrent en outre les dispositions de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau et de la loi n° 93-24 du 8 janvier 1993 sur la protection et la mise en valeur des paysages.

Les modifications portent sur plusieurs points :

- « L'environnement » bénéficie d'une meilleure représentation dans les commissions communale, départementale et nationale ;
- l'étude d'aménagement est rendue obligatoire en amont de l'aménagement foncier. Cette étude comporte « une analyse de l'état initial du site concerné par l'aménagement foncier et de son environnement portant notamment sur les paysages, la qualité, le régime, le niveau et le mode d'écoulement des eaux ainsi que tous éléments ayant une incidence sur la vie aquatique » (article R. 121-20 modifié par l'article 2 du décret du 27 janvier 1995) ;
- les enquêtes publiques concernant le choix du mode d'aménagement et le périmètre et celle concernant le projet sont étendues aux communes où « l'opération paraît de nature à faire sentir ses effets de façon notable sur la vie aquatique, notamment des espèces migratrices, ou sur la qualité, le régime, le niveau ou le mode d'écoulement des eaux ». Cette extension ne concerne pas l'enquête publique relative au classement de la valeur des parcelles ;
- les interventions du préfet : aux divers stades d'avancement de la procédure de remembrement, plusieurs possibilités sont données au préfet pour protéger les haies par des mesures conservatoires.

Il peut ainsi prendre des mesures conservatoires dès que la commission communale est constituée et lui en fait la proposition (article 54-5 de la loi de modernisation agricole).

Après l'enquête concernant le choix du mode d'aménagement et le périmètre, le préfet peut prendre un arrêté en application de l'article L. 126-6 pour prononcer « la protection des boisements linéaires, haies ou plantations d'alignement existant ou à créer, identifiés par la commission d'aménagement foncier conformément à l'article L. 123-8. » (article 8, 2° du décret du 27 janvier 1995).

En fin de procédure, dans l'arrêté de clôture des opérations qui suit l'enquête sur le projet, le Préfet peut décider de protéger des haies ou d'autres éléments susceptibles de réduire les effets de l'érosion, identifiés par la commission communale, en usant de l'extension du régime des espaces boisés classés aux arbres, haies et plantations d'alignement. Grâce à ce nouveau statut, ces espaces pourront ainsi bénéficier des exonérations fiscales, d'aides communautaires au reboisement et éventuellement d'aides complémentaires de collectivités locales pour leur entretien.

Par ailleurs, l'identification de ces espaces permettra au propriétaire de les soustraire au statut du fermage et lui donne la possibilité d'en arrêter les modalités d'entretien par voie contractuelle.

Ces textes améliorent ainsi la possibilité de préserver et de protéger des structures qui déterminent la qualité d'un paysage.

➤ Exemples d'actions pour la prise en compte de l'érosion dans le cadre du remembrement

- L'amélioration de la qualité des études d'impact sur l'environnement passe par une meilleure sélection des bureaux d'études, un financement suffisant de l'étude, la définition d'un cahier des charges détaillé, l'implication de la Dren, et le contrôle effectif de la qualité de l'étude d'impact.
- L'intervention d'un expert en matière de maîtrise de l'érosion auprès du géomètre chargé de l'opération de remembrement améliore la prise en compte de ce thème. Le diagnostic établi concerne la gestion des eaux pluviales et la lutte contre l'érosion des sols et débouche sur des propositions de nature variée (pratiques culturales préconisées pour limiter les écoulements, orientation du parcellaire et positionnement des limites, maintien d'éléments du paysage jouant un rôle stratégique, réservation d'emprises pour la création d'ouvrages hydrauliques).
- La réalisation de pré-études d'aménagement foncier a souvent permis une prise en compte plus en amont de l'environnement, et en particulier du thème de l'érosion.
- Plusieurs départements accordent des aides à la plantation ou à l'entretien de haies ou prise en charge par une collectivité locale (ou par l'AFR) de la réalisation de celles-ci après acquisition de l'emprise.
- De même, une dizaine de départements ont élaboré des chartes «environnement» pour les opérations d'aménagement foncier. Ces départements conditionnent la réalisation d'un aménagement foncier et l'attribution de subventions pour la réalisation de travaux connexes à la conservation et à la mise en valeur de l'environnement.
- Remarque : il est à noter que la prise en compte de mesures anti-érosives est plus facile lors de remembrements liés à la réalisation de grandes infrastructures linéaires dont le financement n'est pas à la charge des collectivités locales.

Maîtrise de l'érosion et PAC

➤ Le programme agri-environnemental

La réduction des sources agricoles de pollution des eaux est l'un des objectifs de ce programme, mais d'autres actions prévues dans ce même cadre peuvent avoir un impact favorable à la maîtrise de l'érosion des sols, en particulier l'amélioration de la protection et de la gestion de la faune (celle-ci implique parfois la reconstitution de haies et de bosquets). Par ailleurs le maintien des paysages ruraux peut constituer un objectif des mesures agri-environnementales.

Ce programme est établi sur la base du règlement CEE n° 2078/92 du Conseil du 30 juin 1992 qui prévoit une aide aux agriculteurs ayant des pratiques respectueuses de l'environnement. Une circulaire du Ministère de l'Agriculture en date du 26 mars 1993 en organise la mise en oeuvre. Dans ce cadre des objectifs de protection des eaux sont établis et peuvent se traduire par trois types d'opérations :

- la protection des captages dans les périmètres sensibles ;
- la protection des cours d'eau par l'installation de bandes enherbées de 10 à 15 m de large ;
- la lutte contre l'érosion, dans les zones de grandes cultures sensibles à ce phénomène.

Dans le cadre de ces opérations, les mesures suivantes sont envisageables :

- la reconversion des terres arables en herbages extensifs, dans le cadre d'engagements de 5 ans ;
- la mise en herbe (non exploitée mais entretenue mécaniquement) des terres arables ou le maintien de prairies non productives par le recours au retrait à long terme dans le cadre d'engagements de 20 ans. Dans les deux cas, le niveau des aides est de 2 500 F par hectare et par an (avec une modulation possible dans la limite de 20%);
- la réduction d'intrants, particulièrement azote et produits phytosanitaires (uniquement pour la protection des captages).

Qu'il s'agisse de la protection des captages ou de celle des cours d'eau, les opérations prévues ont, mis à part la réduction des intrants, également un impact sur l'érosion des sols et sur ses effets, dans les régions concernées par ce phénomène. Cependant, l'efficacité de ces mesures est liée à la qualité de l'animation ; les 10% du budget réservés à celle-ci sont insuffisants.

➤ L'aide au boisement des terres agricoles

Le règlement CEE n° 2080/92 du Conseil du 30 Juin 1992 institue un régime communautaire d'aides aux mesures forestières en agriculture, afin, entre autres objectifs, de contribuer à une gestion de l'espace plus compatible avec l'équilibre de l'environnement.

Le décret n° 94-1054 du ministère chargé de l'Agriculture précise les objectifs de cette aide et en fixe les conditions d'attribution. Parmi les objectifs définis dans l'article 4 de ce décret figure « la protection de l'environnement, en particulier des ressources en eau et la réduction de l'érosion des sols ».

LES PROBLEMES DE L'EROSION DANS 3 REGIONS TYPES

Les exemples ci-dessous sont tirés des rapports régionaux élaborés lors de l'étude sur les « coulées boueuses ». Ils ont été réalisés à partir de la bibliographie existante et de la rencontre avec des personnalités impliquées dans la lutte contre l'érosion au niveau régional.

6.1 La lutte contre l'érosion en région de grande culture : exemple de la Haute-Normandie

Les problèmes rencontrés

La Haute-Normandie est une région caractérisée par de nombreuses manifestations de l'érosion des sols en domaine de grande culture (figure 20). Elle tient sa particularité à la nature du sol, formé de limons épais à très faible stabilité structurale. Des croûtes de battance peuvent se former après seulement 60 à 100 mm de pluie, ce qui correspond à la pluviométrie moyenne d'un mois. Le ruissellement apparaît ainsi rapidement, dès que le sol n'est pas couvert ou trop finement travaillé. De très faibles pentes (1 à 2%) peuvent suffire au déclenchement de l'érosion. Sur des versants de pente supérieure à 5%, les pertes en terre peuvent être importantes et dépasser 50 tonnes par hectare et par an⁵.

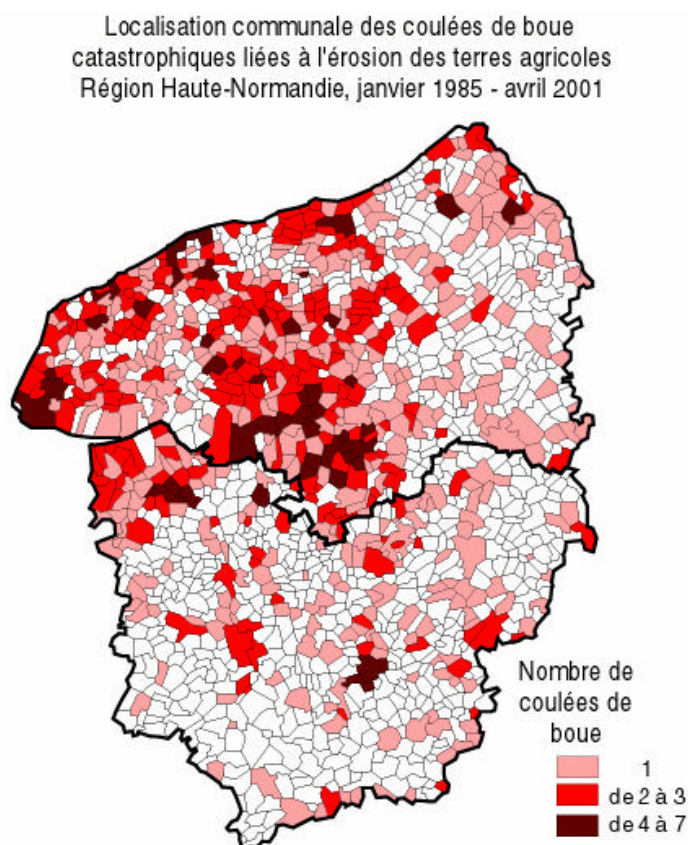


Figure 20 : carte des « coulées boueuses » en Haute-Normandie.

Source : base des coulées boueuses.

⁵ L'érosion est considérée comme préoccupante à partir de quelques tonnes par hectares et par an.

Un grand nombre de « coulées boueuses » se produit (figure 20), surtout lors des orages de fin de printemps et de début d'été (mai, juin, juillet) qui suivent la préparation des lits de semence des cultures de printemps (sol affiné de mars à début mai). En octobre et décembre des dégâts considérables peuvent être observés, car les surfaces potentiellement ruisselantes sont souvent généralisées sur l'ensemble de la région.

La grande quantité de dégâts dans cette région s'explique tout d'abord par l'allongement des parcelles suite au remembrement à partir des années 60. Or, plus une parcelle est longue, plus le ruissellement peut se concentrer et acquérir un volume tel qu'il ne peut plus être stocké ou ré infiltré en bout de champ.

Les dégâts liés aux « coulées boueuses » persistent notamment dans le bassin de la Lézarde (pointe du Havre). Pourtant, de nombreux ouvrages de rétention ont été mis en place sur ce bassin, dans les années 1980, grâce à des financements spécifiques de l'Agence de l'eau. Ces retenues qui ont été coûteuses ne fonctionnent plus aujourd'hui avec leurs capacités originelles par absence de financement pour leurs curages.

Les réponses apportées

La région Haute-Normandie est une région pilote où de nombreuses actions ont été menées pour limiter le déclenchement du ruissellement.

➤ Opération pilote sur le Pays de Caux (Seine-Maritime)

De 1984 à 1990, une opération pilote relative aux inondations et à l'érosion des terres en Pays de Caux a été mise en place. Elle a été décidée suite à la volonté des élus et des responsables agricoles de trouver des solutions à ces problèmes devenus trop importants : lors des inondations catastrophiques en 1978, trois décès sont survenus à Saint-Valéry-en-Caux ; les dégâts matériels semblent toujours importants et les responsables et acteurs ont aujourd'hui pris conscience que l'évolution de l'espace rural aggrave les risques. Enfin, la mise en oeuvre dès 1980 d'aménagements lourds et coûteux de lutte contre les inondations n'ont pas résolu définitivement les problèmes.

Dans le cadre de cette opération pilote, l'Association Régionale pour l'Étude et l'Amélioration des Sols (Areas) a été créée en 1985. L'opération pilote a comporté trois volets d'études :

- Volet 1 – ruissellement et érosion des terres agricoles : il a été réalisé par l'Areas, l'INRA et le ministère de l'Aménagement, du Territoire et de l'Environnement (service de la recherche). Les études ont permis de comprendre et de mesurer les processus du ruissellement et de l'érosion. De nombreuses expérimentations portant sur divers moyens de lutte, notamment les pratiques culturales, ont été effectuées.
- Volet 2 - détermination des flux à l'aval d'un bassin versant agricole : cette étude proposée par la DDE avait pour but de déterminer sur un bassin versant non urbanisé, une corrélation entre la pluviométrie, le ruissellement et l'état cultural des terres agricoles.
- Volet 3 - évolution du paysage et risque d'érosion : l'objectif de l'étude était de mettre en évidence l'évolution du parcellaire, des haies, des mares et du bâti dans la région de Saint-Valéry-en-Caux et dans la basse vallée de l'Yère, à partir de photographies aériennes.

A la suite de cette opération, un certain nombre d'aménagements ont été réalisés, notamment des bassins de rétention, des mares, des digues et des prairies d'inondations.

L'Areas a continué d'exister après la fin de l'opération pilote. Elle est actuellement une structure unique en France et a largement contribué à l'avance de la Haute-Normandie sur les autres régions françaises, en matière de connaissance des systèmes érosifs et des méthodes de lutte en région de grandes cultures. Elle a pour rôle d'animer les actions d'information et de sensibilisation des acteurs de la lutte contre l'érosion : agriculteurs, conseillers agricoles, élus... Elle intervient systématiquement dans tous les remembrements⁶.

L'Areas étudie le volet hydraulique du dossier de remembrement, à titre d'expert en matière de maîtrise de l'érosion auprès du géomètre chargé de l'opération de remembrement. Le diagnostic établi concerne la gestion des eaux pluviales et la lutte contre l'érosion des sols et débouche sur des propositions de nature variée (pratiques culturales préconisées pour limiter les écoulements, orientation du parcellaire et positionnement des limites, maintien d'éléments du paysage jouant un rôle stratégique, réservation d'emprises pour la création d'ouvrages hydrauliques et propositions d'aménagements collectifs). Le rôle de sensibilisation de l'Areas et sa connaissance des démarches nécessaires au bon déroulement de la procédure permettent outre la lutte contre l'érosion d'éviter des expropriations.

➤ **Réalisation d'une série de cartes sur l'érosion et moyens mis en œuvre pour lutter contre ses manifestations :**

- Carte régionale des **zones sensibles à l'érosion** en vue de l'application des mesures agri-environnementales ;
- carte du nombre de « coulées boueuses » par communes, remise à jour régulièrement ;
- cartes de la densité des aménagements de lutte contre le ruissellement, des bassins de lutte contre le ruissellement, des mares aménagées, des prairies inondables et des digues aménagées, des aménagements d'infiltration et de végétalisation, des projets d'aménagement de lutte contre le ruissellement, etc.

Les cartes sont disponibles sur le site internet de l'Arehn, <http://www.arehn.asso.fr>.

➤ **Fond de Gestion de l'Espace Rural (FGER) de la Seine-Maritime :**

En Seine-Maritime, le FGER est presque intégralement utilisé pour la lutte contre les inondations et l'érosion, en permettant le financement de petits aménagements, tels que les digues ou les mares, ayant pour rôle de freiner les débits. En 1996, une quarantaine d'aménagements ont été ainsi prévus pour un budget d'environ 3 millions de francs. Le FGER a été utilisé jusqu'à présent uniquement pour des investissements, mais il peut également permettre de répondre à des demandes de financement d'entretien de bandes enherbées ou de talus.

➤ **SAGE et Contrat Rivière.**

⁶ Depuis la loi du 8/01/93 et le décret d'application n° 95-88 du 27/01/95, une pré-étude d'aménagement foncier est réalisée dans toute opération de remembrement. Les volets « environnement » et « aménagement » de la pré-étude permettent à la commission communale ou intercommunale d'aménagement foncier de décider ou non d'un remembrement et de ses modalités. Une étude d'impact est ensuite réalisée conformément au décret d'application du 12/10/77 de la loi sur la protection de la nature. Les prescriptions et les recommandations doivent être établies selon les principes énoncés par la loi sur l'eau (3/01/92) et la loi sur les paysages (8/01/93, décret d'application du 27/01/95).

En Haute-Normandie, les SAGE seront des bassins de l'ordre de 800 à 2 000 km². Des unités plus petites ne seraient pas supportables financièrement par les communes.

Des contrats de rivière incluant des projets anti-érosifs sont actuellement en cours. C'est le cas des bassins de la Lévrière et de la Bonde dans le nord-est de l'Eure. En Haute-Normandie, les SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) qui sont des procédures longues, ne se mettront en place qu'en 1997 avec le 7^{ème} programme de l'Agence de l'Eau. Ils bénéficieront de subventions de l'Agence, notamment pour réaliser des aménagements très à l'amont sur les terres labourées. Plusieurs associations de communes sont déjà intéressées par les SAGE, tels les SIVOM du Caux Maritime et de la pointe du Havre, ainsi que sur les bassins de l'Andelle.

➤ **Mise en place d'un pôle de compétence « sol et eau ».**

En janvier 1995, 200 communes de Seine-Maritime ont été victimes de dégâts des eaux et ont été reconnues au titre des « catastrophes naturelles » par la Commission interministérielle. A la suite de ces événements, le préfet de région et le président du Conseil régional de Haute-Normandie ont décidé de constituer un pôle de compétence « sol et eau ».

L'objectif de ce pôle est d'organiser et coordonner la lutte contre l'érosion en favorisant une synergie entre la recherche, l'enseignement et le développement, afin d'élaborer une stratégie régionale pour maîtriser le ruissellement et limiter l'érosion des sols.

Il devra prendre en compte les processus complexes du ruissellement, de l'érosion, des inondations et de la qualité des eaux.

Suite aux réunions du comité de pilotage régional depuis 1995, une grande série d'actions ont été engagées, parmi les quelles on peut citer :

- La réalisation d'une synthèse des connaissances disponibles et des aménagements effectués dans la région ;
- des actions de sensibilisation (diffusion de plaquettes d'informations, organisation d'un forum) ;
- la mise en œuvre d'opérations de gestion collectives appliquées à un bassin versant : programmation d'aménagements, modifications des pratiques culturales, mise en place de bandes enherbées, etc. ;
- la réalisation de nombreuses études (cartographie des risques, expérimentations de pratiques agricoles, modélisations des phénomènes, analyse des techniques de lutte contre l'érosion, etc.).

L'ensemble de ces informations, ainsi que des photos, études locales, conseils, etc. sont disponibles sur le site internet de l'Arhen (<http://www.arhen.asso.fr>).

6.2 La lutte contre l'érosion en région de vignoble : exemple de l'Alsace

les problèmes rencontrés

L'Alsace est assez fortement touchée par les « coulées boueuses ». Dans le vignoble (bande centrale de la région), les coulées se déclarent surtout lors des orages d'été, où la brutalité des précipitations provoque des dégâts importants. De forts ravinements peuvent aussi se produire en hiver, lorsque des

pluies de forte intensité tombent sur des sols déjà saturés ou couverts de neige. Par ailleurs, les vignes sont en majorité traitées chimiquement et le tassement du sol accroît la vitesse du ruissellement.

Localisation communale des coulées de boue
catastrophiques liées à l'érosion des terres agricoles
Région Alsace, janvier 1985 - avril 2001

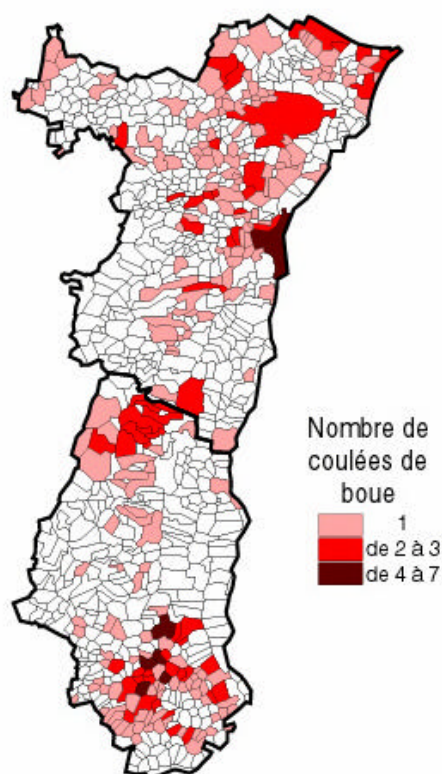


Figure 21 : carte des « coulées boueuses » en Alsace.

Source : base des coulées boueuses.

Au sud, les vignes occupent 50 à 60% de la SAU et sont plantées en très forte pente sur des sols assez instables, tandis que la surface toujours en herbe est à peu près inexistante.

Au nord, L'origine des problèmes de « coulées de boue » vient cette fois du fait que la vigne est plantée sur des sols sableux très propices au ruissellement. Les pentes sont moins fortes qu'au sud et le vignoble occupe un peu moins de surface (entre 5 et 10% de la SAU), mais il conquiert l'espace laissé libre sur les versants, tandis qu'à l'aval sur le piémont, les cultures de printemps occupent 30 à 50 % de la SAU. De nombreuses coulées se déclenchent autour des points noirs de Mutzig ou Marlenheim notamment, mais ne provoquent pas toutes des dégâts aux habitations.

Remarque : Le groupe de communes au sud de la région est concerné par des problèmes d'érosion de grandes cultures sur sols battants (région du Sundgau).

Les réponses apportées

➤ **Petits aménagements et pratiques culturales pour lutter contre l'érosion dans le vignoble Alsacien**

- Aménagements hydrauliques : les premiers aménagements hydrauliques ont été réalisés au début des années 60. Le financement était effectué à 30 ou 40% par le Conseil général, le reste était apporté par les collectivités. Quelques terrasses, notamment dans la région de Rique-Vihr ont également été mises en place.
- Enherbement : actuellement, 30 à 35% du vignoble Alsacien est enherbé. L'enherbement dans le vignoble s'est beaucoup développé, et ce pour plusieurs raisons : dans le début des années 70, l'objectif de l'enherbement était de produire de la matière organique : l'absence de compost urbain disponible renforçant le développement de cette technique. La demande de la clientèle en vins issus de cultures utilisant moins de produits phytosanitaires et de désherbants ainsi que l'influence des idées allemandes sur la protection de l'environnement ont accentué également la pratique de l'enherbement dans la région.
D'autres raisons ont facilité l'implantation de l'enherbement dans le vignoble alsacien : les vignes larges et hautes diminuent les risques de concurrence pour l'eau⁷ et facilitent le passage des engins. Un tiers des viticulteurs vendent eux-mêmes leur vin, ce qui les rapproche d'un public sensibilisé aux problèmes d'environnement. La présence d'agents d'aide technique sur le terrain et une bonne structuration de la propriété foncière sont aussi des avantages dont les viticulteurs ont tiré parti.

➤ **Un schéma d'aménagement régional.**

Le schéma d'aménagement régional mis au point en 1990 aborde les problèmes des « coulées de boue » et du ruissellement. Il comporte notamment un schéma d'aménagement régional des eaux ayant comme objectif la lutte contre les dégâts des eaux superficielles, pour protéger les lieux urbanisés et les terres agricoles et pour réhabiliter les rivières comme biotope naturel.

Les moyens mis en oeuvre pour maîtriser les excès d'eaux superficielles portent sur :

- le maintien de la couverture végétale du sol : il convient de favoriser les pratiques culturales anti-érosion dans le vignoble, notamment la plantation des vignes selon les courbes de niveau lorsque cela est possible, le remplacement du labour par l'enherbement. D'après la Chambre d'Agriculture du Haut-Rhin, l'enherbement peut être utilisé sur de nombreux sols sans risque de concurrence pour l'eau avec la vigne elle-même. Il faut aussi maîtriser le développement des cultures céréalières qui se fait actuellement au détriment des prairies dans le Sundgau ;
- la conservation des champs d'épandages naturels dans les zones sensibles, comme par exemple les prairies ;
- la limitation ou l'interdiction de construire dans les zones inondables ;
- la mise en place de bassins de décantation pour lutter contre les conséquences des pluies d'orage dans le Sundgau ;
- l'entretien des cours d'eau (curage, dégagement du lit, etc.).

⁷ Cependant, pour certaines d'entre elles, la concurrence hydrique n'est pas négligeable, ce qui peut influencer sur les caractéristiques œnologiques du vin.

Dans le département du Bas-Rhin, les travaux d'aménagement du vignoble ont été effectués jusqu'en 1989, subventionnés à 20 % par l'État et 16.5 % par le département. Le montant global des travaux a atteint la somme de 10 000 000 F TTC (1 525 000 euros).

Dans le département du Haut-Rhin, les travaux d'aménagement du vignoble ont été subventionnés jusqu'en 1984 par le département et par le ministère chargé de l'Agriculture au titre du programme d'hydraulique agricole. Ce programme a été complété en 1990 par un programme de réalisation de bassins d'orage ou de bassins de compensation pour les communes qui ne sont pas situées dans le vignoble. Depuis 1980, le montant des travaux a atteint environ 37 250 000 F TTC (5 680 000 euros). Pour les travaux commencés en 1990, le budget consacré sera de 100 000 000 F TTC (15 245 000 euros) pour le vignoble et de 15 000 000 F TTC (2 290 000 euros) pour le Sundgau.

6.3 La lutte contre l'érosion en zone urbaine : exemple de l'Ile-de-France

Les problèmes rencontrés

La région Ile-de-France (figure 22), dans ses espaces de grandes cultures, est concernée par les phénomènes d'érosion. Les problèmes essentiels sont liés à la **dégradation de la qualité des eaux**. Les rivières sont en effet polluées par des nitrates et pesticides en solution, ainsi que par des phosphates, certains pesticides et métaux lourds, véhiculés par les matières en suspensions (MES). L'érosion entraîne la migration de ces éléments polluants qui, crue après crue, sont transportés vers l'aval. Ils posent ainsi de graves problèmes au niveau de l'alimentation en eau potable de la région (multiplication des traitements). Dans la Brie, suite à une enquête auprès des agriculteurs, ceux-ci déclarent ne pas être gênés par l'érosion, qui est essentiellement diffuse. Les sols étant ici épais, les dégâts ne se remarquent pas et les traces d'érosion concentrées sont rares dans la zone agricole (Sogon et al, 1999). Par contre, les dégâts dans les villages à l'aval, provoqués par des « coulées boueuses », peuvent être spectaculaires.

Localisation communale des coulées de boue catastrophiques
liées à l'érosion des terres agricoles
Région Ile-de-France, janvier 1985 - avril 2001

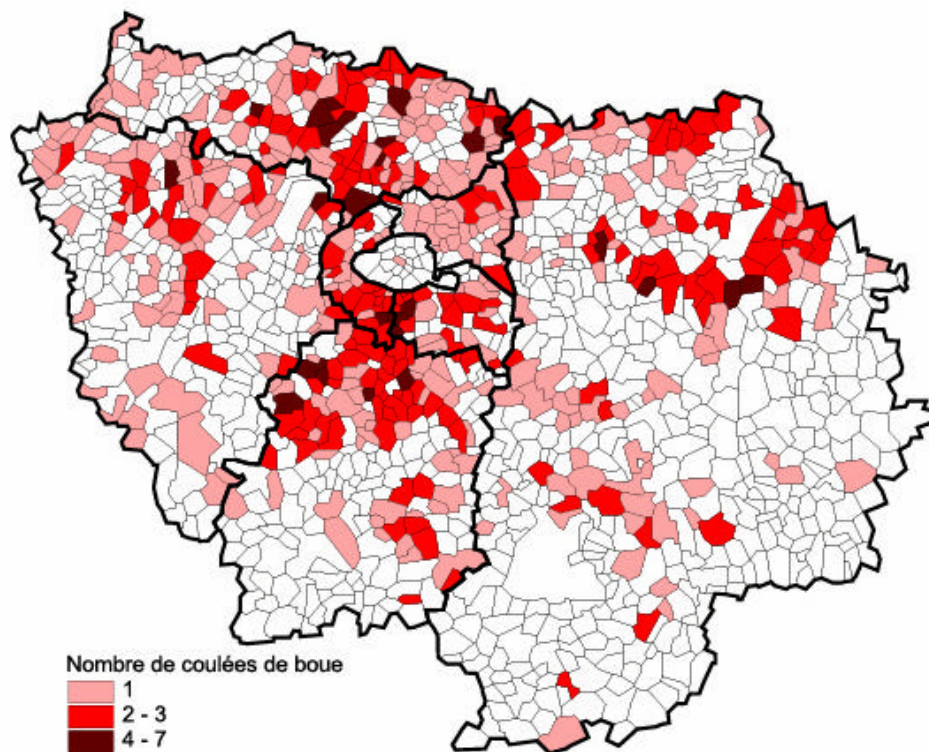


Figure 22 : carte des « coulées boueuses » en Ile-de-France.
Source : base des coulées boueuses.

La plupart des événements catastrophiques en Ile-de-France ont lieu au printemps (averses de fortes intensités), suite à la formation de ravines temporaires sur les cultures à peine levées.

Les risques ne sont pas non plus exclus en été en cas de violents orages. Lors des hivers très pluvieux (pluies persistantes de faibles intensités sur sols saturés), les risques de forts ruissellements, d'érosion et d'inondation peuvent aussi être élevés, car le couvert végétal ne s'installe souvent qu'après la formation d'une croûte de battance.

Les deux situations de fort ruissellement sont en effet : les hivers aux longues périodes pluvieuses sans ressuyage suffisant des sols, où même une petite pluie produit un ruissellement généralisé ; et le printemps en cas de violentes averses. Les orages d'été étant souvent très localisés peuvent produire des dégâts importants mais eux-mêmes locaux.

L'urbanisation accroît d'une manière importante la vulnérabilité vis-à-vis des «coulées de boue », mais n'a que peu d'influence sur l'augmentation de l'aléa lui-même, car les zones urbaines sont en général localisées à l'aval des bassins. Les dégâts augmentent incontestablement dans les zones nouvellement construites, essentiellement dans le département du Val d'Oise.

Les routes en milieu rural ne comportent pas toujours de système efficace permettant d'évacuer l'eau sans dommage, en particulier, lorsqu'il s'agit d'anciens chemins de terre goudronnés.

Les réponses apportées en Ile-de-France

Une des premières réponses a, tout d'abord, porté sur l'amélioration de la compréhension et de la quantification des phénomènes érosifs. La recherche scientifique s'est mobilisée en Ile-de-France

pour mieux comprendre et quantifier. Citons notamment l'apport du programme **Piren-Seine**, qui s'est attaché à modéliser l'érosion et comprendre les mécanismes de mobilisation et le transport des matières en suspension (MES) lors des crues de rivières. Couplée à de nombreux relevés de terrain, cette modélisation a notamment permis de montrer l'importance des réseaux de drainage agricole qui, en étendant artificiellement le système hydrologique sous les champs cultivés, augmentent considérablement la quantité de matière en suspension exportées par les cours d'eau (Sogon et al, 1999). Le suivi d'un bassin-versant de 25 ha dans la Brie sur une durée de quatre ans a permis d'évaluer la quantité de matière érodée lors d'une année pluvieuse : la perte nette annuelle en sol mesurée dans la rivière en bas du bassin est approximativement de 1 t/ha/an.

La prise en compte de ce phénomène d'érosion par l'**IAURIF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France)**, se traduit notamment par un suivi à l'aide d'un Système d'Information Géographique, permettant des analyses multicritères à partir de sur l'urbanisation, l'occupation du sol et le réseau hydrographique.

Au niveau des réponses plus opérationnelles, on peut noter par exemple, la mise en place lors de la construction de la déviation d'une route à Puisieux-en-France, de fossés, de canalisations et autres aménagements hydrauliques. Ces travaux ont été cofinancés par l'état et le SIAH (Syndicat Intercommunal pour l'Aménagement Hydraulique des vallées du Croult et du petit Rosne), créé en 1932 et regroupant la plupart des communes du bassin versant du Croult. L'objectif principal de cette opération, en organisant la maîtrise des eaux sur la commune afin de lutter contre les inondations, contribue également à réduire la vulnérabilité de la zone vis-à-vis de l'érosion.

CONCLUSION - RECOMMANDATIONS

Ce document rassemble l'essentiel des données actuellement disponibles et exploitables concernant les risques d'érosion des sols en France. Le modèle développé par l'INRA a été amélioré et réactualisé suite à plusieurs tests réalisés à différentes échelles et a abouti à hiérarchiser de manière objective les différentes régions en fonction de l'importance des phénomènes érosifs. La remise à jour du fichier des « coulées boueuses » à partir des arrêtés d'état de catastrophe naturelle permet de se faire une idée de l'ampleur des dégâts provoqués par l'érosion des sols en France. Les informations apportées par ce fichier permettent, malgré les réserves évoquées, une première validation du modèle d'érosion : la corrélation forte entre ces deux sources a montré que la comparaison était pertinente. L'inventaire des mesures de lutte contre l'érosion des sols réalisé dans les différentes régions françaises, montre qu'une grande diversité de mesures, adaptées à chaque situation, existent pour lutter contre les conséquences négatives de ce phénomène. Les actions, souvent dues à des initiatives individuelles, doivent être ensuite relayées par des actions coordonnées à l'échelle des bassins versants ou des petites régions agricoles. L'information sur l'ampleur et les conséquences des phénomènes d'érosion des sols revêt une importance d'autant plus grande qu'à l'érosion elle-même sont généralement liées d'autres types de préoccupations environnementales comme la pollution des eaux souterraines ou de surface, l'accroissement de la turbidité, l'entraînement de phosphore (eutrophisation) et de produits phytosanitaires. Il faut également veiller aux éventuelles conséquences sur le ruissellement et la qualité de l'eau de certaines pratiques préconisées dans la lutte contre l'érosion (techniques culturales simplifiées).

Ce rapport permet aussi de tracer les grandes lignes d'actions qui pourraient être mises en oeuvre dans les prochaines années :

1 – Mise à jour permanente du fichier des « coulées boueuses » : sans méconnaître l'intérêt de la base CORINTE, dédiée aux catastrophes naturelles, il serait nécessaire d'organiser la saisie des informations concernant les « coulées de boue », directement à partir des dossiers de demande d'indemnisation pour catastrophe naturelle. Le contenu de ces dossiers pourrait être réaménagé afin de mieux différencier les « coulées boueuses » des inondations. Les informations qui y sont contenues donneraient une idée plus précise de la façon dont aléa et risques liés aux « coulées boueuses » évoluent dans le temps. Elles permettraient probablement une quantification plus fiable des dégâts.

La mise à jour et la fiabilisation de cette base autoriseraient, malgré les réserves évoquées dans le présent rapport, une validation plus aisée du modèle d'aléa d'érosion.

2 – Mise à jour des données du modèle : le modèle présenté dans le présent document pourra donner lieu à une réactualisation, après mise à jour de bases de données, telles que CORINE land cover (2004) ou du RGA, et lorsque l'on disposera d'une carte nationale sols plus précise sur l'ensemble de la France.

3 – Réaliser un bilan région par région des impacts de l'érosion : région par région, un bilan concernant les problèmes posés par l'érosion des sols pourrait être entrepris, en s'appuyant sur les informations apportées par les deux types d'approche utilisés dans ce rapport : inventaire et modèle. En effet, des cartes des sols plus précises (programme Inventaire Gestion Conservation des Sols) existent déjà pour certaines régions. En se rapprochant des acteurs de terrain, il serait possible de mettre plus facilement en regard les enjeux environnementaux et économiques régionaux. En effet, il est probable que le coût global pour la collectivité des manifestations de l'érosion des sols soit encore largement sous-estimé.

BIBLIOGRAPHIE

- ADRET, 1987.- *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion hydrique des sols dans les coteaux du Sud-Ouest*. Rapport ministère de l'Environnement / ministère de l'Agriculture, 36 p.
- ADEPRINA, 1988 - *Remembrement de Chelles et Saint-Etienne-Roilaye (Oise)*. Etude agro-pédologique. Analyse de l'érosion hydrique à Chelles et Saint-Etienne-Roilaye (Oise). Proposition de création de dispositifs de lutte contre l'érosion dans le cadre du remembrement, 116 p.
- ADEPRINA, 1990 - *Remembrement et lutte contre l'érosion dans le département de l'Oise*, 47 p.
- Agence de l'eau Artois-Picardie, 1995 - *Rapport sur la qualité des eaux de l'Authie à Raye-sur-Authie*, avril 1995, 11 p.
- AREAS, 1989 - *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en région de grande culture*. Journées d'études des 23-24-25 mai 1989. Association régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols, Rouen.
- AREAS, Chambre d'agriculture de Seine-Maritime, 1994 - *Plan de Développement durable en Pays de Caux. Diagnostic de territoire*. Rapport intermédiaire, mai 1994. 23 p. + annexes.
- AUMONIER F. (1987) - *Téledétection et érosion : la battance dans le nord de la France*. DESS Université Paris VI. BRGM. 25 p.
- AUVRAY L., 1991 : *L'érosion des sols par le ruissellement des eaux pluviales sur les vignobles du Beaujolais*. Université Claude Bernard (Lyon I) - DEUST Les métiers de l'eau INGEFRA Parc d'activité du Chêne - BRON.
- AUZET A.V., 1987 - *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques*. Centre d'études et recherches éco-géographiques, ministère de l'Environnement / ministère de l'Agriculture, 60 p.
- 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., GUERRINI M.C., MUXART T., 1992 – « L'agriculture et l'érosion des sols : importance en France de l'érosion liée aux pratiques agricoles ». Actes du colloque « L'agriculture et la gestion des ressources renouvelables » (Paris, 29/30 mai 1991), *Economie rurale*, n° 208/209, pp. 105-110.
- BACHIN V., 1992 - *L'érosion dans les systèmes de grandes cultures du Sud-Ouest : le point sur les connaissances*. ESAP, mémoire bibliographique 31 p.
- BALLIF J.L., HERRE Ch., 1984 - *Etude du ruissellement et de l'érosion dans le vignoble champenois*. INRA Châlons-sur-Marne, 76 p.
- BALLIF J.L., HERRE Ch., 1988 – « Contribution à l'étude du ruissellement des sols viticoles en Champagne. Effets d'une couverture de compost urbain ». In *C.R. Académie Agriculture.*, vol. 74, n°2, pp. 105-110.
- BALLIF J.L., 1992 – « Des écorces pour lutter contre l'érosion ». In *Viticulture*, décembre 1992, pp. 49-52.
- BARRIERE J., 1960 - *Quelques exemples d'érosion anthropique dans la région de Capestang*. CNABRL, Subdivision de l'exploitation et de la mise en valeur, Service étude des Sols. Nîmes, janvier-juin 1960.
- BARTHES B., DE NONI G., GUILLERM C., ROOSE E., 1997 – « Pratiques culturales et érosion hydrique dans les rougiers de Camarès (Aveyron, France) ». In *Réseau érosion*, bulletin n° 17 : érosion en montagnes semi-arides et méditerranéennes. ORSTOM, pp.145-151.
- BAUDRY J., TROEL M.C., BUREL F., ASSELIN A., 1986 - *Erosion des terres agricoles et aménagement foncier*. Rapport CERESA, ministère de l'Agriculture, 94 pp. + annexes.

- BAUMANN O., 1983 - *Le Haut Bassin de l'Ouanne : approche méthodologique d'un bocage en mutation. Conséquences des transformations du paysage agraire sur la capacité de stockage de l'eau dans les sols*. Thèse de géographie physique. Université Paris VII. 418 p.
- BEAUDOIN C.F., MARQUIS N., VERJUX E., 1985 - *Etude par enquête de l'érosion dans le vignoble champenois*. ministère de l'Agriculture, DDAF de la Marne, INA-Paris Grignon.
- BERMUDEZ FL., ESCUDERO JDG., 1982 - « Estimacion de la erosion y aterremientos de embalses en la cuenca hidrografica del rio Segura ». in *Cuadernos de investigacion*, tomo VIII, fasciculos 1-2, Logrono, Colegio Universitario de la Rioja.
- BEUVE P. (1989) - *Essai d'évaluation de la sensibilité à l'érosion des sites du Nord du Bassin de Paris. Prise en compte des caractéristiques de la couverture pédologique*. DAA ENSA Rennes. Chaire de Science du Sol. INRA Laon. 56 p.
- BIAGI B., 1986 – “Development of a database of land characteristics and computerized analysis of actual and potential land degradation risks”. In *Soil erosion of the european community*, G Chisci & RPC Morgan (eds), Rotterdam, Balkema.
- BILLOT J.F., DALLEINNE E., 1982 – « Travail du sol et érosion pluviale en Pays de Caux maritime ». *Bulletin d'information du CEMAGREF*. n° 292, 9 p.
- BOIFFIN J., 1984 - *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse de docteur-Ingénieur. de l'INA-PG, 320 p. + annexes.
- BOIFFIN J., PAPY F., 1988 – « Prévision et maîtrise de l'érosion : influence des systèmes de cultures ». *Perspectives agricoles* 122, pp. 93-98.
- BOIFFIN J., PAPY F., PEYRE Y., 1986 - *Système de production, système de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux*. Ministère de l'Agriculture, DIAME, INAPG, INRA, 157 p.
- BOIFFIN J., BRESSON L.M., 1987 – « Dynamique de formation des croûtes superficielles : apport de l'analyse microscopique ». In Fedoroff N., Bresson L.M., and Courty M.A. (eds.), *Soil micromorphology*, AFES, pp. 393-399.
- BOIFFIN J., PAPY F., EIMBERCK M., 1988 – « Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré ». I - Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8 (8), pp. 663-673.
- BOLLINNE A., 1979 - *L'érosion en région limoneuse. Ses causes, ses conséquences*. Colloque sur l'érosion agricole en milieu tempéré non méditerranéen, Strasbourg, 20-23 septembre 1978, pp. 95-100.
- BORDAS, C., 1995 - *Les mouvements de terrain d'origine anthropique en Corrèze*. Mémoire de maîtrise, Université de Limoges, 114 p.
- BOUDJEMLINE D., 1987 - *Susceptibilité au ruissellement et aux transports solides de sols à texture contrastée, étude expérimentale au champ sous pluie simulée (Lauragais et Mont-Lozère)*. Thèse de doctorat 3ème cycle, Université d'Orléans, 266 p.
- BOUMA J., Van LANEN H.A.J., 1986 - “Transfert functions and threshold values : from soil characteristics to land qualities”. In *proceedings of the international workshop on quantified land evaluation procedures*. 27/04-2/05/1986, Washington DC. USA, pp.106-110.
- BRIGGS D.J., BRIGNALL P., WILKES A., 1989 - *Assessing soil erosion risks in the mediterranean region: the Corine program of the European Community*. Proc. Workshop Wageningen, 1988, Van LANEN & BREGHT (eds) Publication of the EC, Luxembourg, p. 195-200.
- BRUNET R., 1957 - « L'érosion accélérée dans le Terrefort Toulousain ». *Revue de Géomorphologie dynamique*, tome VIII, n°3-4, pp.33-40.
- BRUNET R., 1965 - *Les campagnes toulousaines. Etude géographique*. Thèse Université de Toulouse.
- CADEVILLE G., VOGT H., 1995 - « Fragilité des terres agricoles ». In *Atlas de France, milieux et ressources* Vol 6. La documentation Française, pp. 108 - 112.

- Collectif INRA, SCEES, 1989 - *Le grand atlas de la France rurale*. Sous la direction de A. BRUN, 494 p.
- CANARD M., DAMAREE A., 1988 - *Phénomènes d'érosion des surfaces agricoles, Pyrénées Atlantiques, juin 1988*. Mémoire de licence d'aménagement, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 25 p. + annexes.
- CAR Canche-Authie (1978) - *Etude sur l'érosion des terres agricoles dans le Val de Canche*. - Programme Erosion du CAR Canche-Authie, proposition n° 9 du Contrat de Pays Val de Canche.
- CAVALIE J., 1990 - « L'érosion des sols : situation en Midi-Pyrénées et techniques de conservation des sols ». *Les techniques agricoles, Techniques 2000*, pp.42-49.
- CEMAGREF, 1986 - *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau. Guide à l'usage des aménageurs*. 145 p. + 56 p. annexes.
- CEMAGREF, 1987 - *Les dégâts causés par les pluies intenses, recherche de remèdes. 1: techniques culturales pour limiter la genèse du ruissellement*. Groupement d'Antony. 15 p. + annexes.
- CEMAGREF, 1987 - *Les dégâts causés par les pluies intenses, recherche de remèdes. 2: techniques d'aménagement pour contrôler le ruissellement et l'érosion*. Groupement d'Antony. 37 p. + annexes.
- CEMAGREF, 1994 - *Quelques techniques de lutte contre les inondations et coulées boueuses en zones péri-urbaines*. Note récapitulative réalisée à partir d'une étude menée en 1986-1988 par le CEMAGREF sur les dégâts causés par les pluies intenses dans le Val d'Oise. Groupement d'Antony. 12 p. + annexes.
- Centre permanent d'initiation à l'Environnement (CPIE) du Val d'Authie, 1994 - *L'Authie dans son milieu, étude d'aménagement hydraulique et de restauration des milieux aquatiques*, 1^{ère} partie, janvier 1994. 132 p.
- CERESA, 1987 - *L'érosion des terres agricoles dans le Massif Armoricaire. Risques à l'échelle régionale et maîtrise du ruissellement lors d'opérations d'aménagement*. Centre d'Etudes et de Recherches sur l'Environnement et les Sols pour l'Aménagement. Ministère de l'Environnement / ministère de l'Agriculture. 33 p.
- Chambre d'Agriculture de la Haute-Garonne - Association départementale de vulgarisation agricole SUAD, 1984 - *Etude Action Développement : lutte contre l'érosion. Pré-étude 1983*. ACVA Caraman - ACVA Verfeil. Rapport, 27 p.
- Chambre d'Agriculture du Pas-De-Calais, 1994 - *Etude, mise en place et suivi d'aménagements anti-érosifs dans le Val de Canche*. 15 p.
- Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire, 1988 - *L'érosion des sols de vignoble, manifestation, mécanismes, remèdes*. Mâcon, septembre 1988, 23 p.
- Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire, 1989 - *Charte des zones sensibles à l'érosion applicable aux communes viticoles du département de Saône-et-Loire*. 8 p.
- Chambre d'Agriculture de la Somme, 1990 - *Lutte contre l'érosion des sols dans le Ponthieu. Bilan des trois années d'actions et de sensibilisation (1988-1990)*. Amiens, 36 p.
- Chambre d'Agriculture de la Somme, 1994 - *Etude hydraulique sur la commune de Mareuil-Caubert*. Groupe agro-environnement, 19 p.
- Chambre d'Agriculture de la Somme, 1993 - *Regard sur l'agriculture de la Somme*. Paris, 79 p.
- Chambre d'Agriculture de la Somme, 1993 - *Spécial agronomie*, supplément au n°103 de horizon 2000. Juillet 1993, 50 p.
- Chambre départementale d'Agriculture - Conseil général du Rhône, 1990 - *Contrat de lutte concertée contre l'érosion dans le département du Rhône*. Application de la convention signée le 4 Décembre 1990 entre le Conseil général du Rhône, la Chambre d'Agriculture du Rhône et l'Union viticole du Beaujolais.

- CHERY P., 1990 - *Modélisation spatiale de la sensibilité au ruissellement et à l'érosion. Recherche sur la combinaison de données cartographiques du milieu. Région Nord-Pas-de-Calais*. DEA de pédologie. Université Paris VI. - INRA Orléans. 47 p.
- CHERY P., LE BISSONNAIS Y., KING D, DAROUSSIN J., 1992 – « Définition et délimitation des unités spatiales de fonctionnement (USF) du ruissellement et de l'érosion ». In Buche P., King D. and Lardon S. (Eds.), *Gestion de l'espace rural et système d'information géographique*, INRA, pp. 133-147.
- CMS, 1995 - *Maîtrise des phénomènes d'érosion et de ruissellement des terres agricoles. Etude d'un schéma général d'aménagement*. Document de travail Communauté urbaine de Lyon, Chambre d'Agriculture du Rhône. Cabinet MOREL SA, Vonnas (01) et Etapes-Environnement SARL, Le-Sappey-en-Chartreuse (38).
- COCHET (Abbé), 1842 - *Les inondations ; pèlerinage à Fécamp, Yport, Vaucotte et Etretat, après les inondations du 24 septembre 1842*. Périaux, Rouen, 30 p.
- COLLECTIF, 1990 - *Soil map of the European Communities, 1 000 000^e. Soil map of middle Europe*. Commission of the European Communities. Directorate general for agriculture.
- COLLECTIF, 1992 - *Corine soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Communities*. Brussels. 97 p. + cartes.
- COLLECTIF, École Supérieure d'Agriculture de Purpan, 1993 - *Gestion régionale sols et sensibilité à l'érosion*. Mise au point d'une méthodologie basée sur les SIG. 41 p.
- COLLECTIF, ministère de l'Environnement, 1996, non publié - *Les « coulées de boue » liées à l'érosion des terres agricoles*. Dossiers et cartes nationaux, dossiers et cartes régionaux.
- Comité de Bassin Seine-Normandie, 1995 - *Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux du bassin Seine-Normandie*, 138 p.
- *Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen*. Strasbourg-Colmar, 20 septembre 1978. 251 p.
- Comité de Développement du Beaujolais - CEMAGREF Lyon - *Charte pour la qualité. Ensemble de fiches pour la sensibilisation à la lutte anti-érosive et la vulgarisation des diverses techniques*.
- Comité interprofessionnel du vin d'Alsace, 1990 - *Les unités de paysage et les sols du vignoble alsacien*. GIE sol-conseil, agence de Strasbourg, Association pour la relance agronomique en Alsace.
- Comité interprofessionnel des Vins Doux Naturels, 1992 - *Aménagements et entretien des sols viticoles vis à vis de l'érosion*. Journée Viticole du 9 Avril 1992. Station viti-vinicole du CIVDN - 66300 Tresserre. 28 p.
- Conseil Général de la Somme, 1994 - *Un plan Départemental Environnement pour la Somme*. 147 p.
- Conseil général du Val d'Oise, ministère de l'Environnement, CEMAGREF, Université de Paris VII, 1986 - *Ruissellement, érosion, inondation dans le bassin du Croult (Val d'Oise), Recherche sur les causes d'aggravation*, 178 p.
- Conseil régional d'Alsace, 1990 - *Schéma régional d'aménagement des eaux ; la maîtrise des excès d'eau en Alsace. Bilan, besoins, ressources en eau à l'horizon 1995-2000*. Comité technique de l'eau « Alsace », Service régional de l'Aménagement des Eaux en Alsace. 25 p. + annexes.
- Conseil scientifique régional de l'Environnement, 1995 - *Pour une meilleure efficacité des études d'impact en Bretagne : un cahier de recommandations en 16 propositions*. Région Bretagne, juillet 1995, 24 p.+ annexes.
- COSANDEY C., MUXART T., non daté - *Estimation du risque érosif lié à l'extension des terres agricoles sur le Causse Méjan*. Observatoire «Causses-Cévennes » du PIREN Laboratoire de Géographie physique UA-0141 CNRS.

- COSTE N., ETCHANCHU D., 1988 - *Lutte contre l'érosion : étude de la descente des terres par le travail du sol*. UPS et Chambre d'Agriculture Haute-Garonne, 21 p.
- COZERET O. - *Les mouvements de terrain dans la Champillon-Dizy-Hautwilliers (Marne)*. Travaux de l'Institut de géographie de Reims. n°69, 70, 71, 72. pp. 129-150.
- CROS-CAYOT S., 1996 - *Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant*. Contexte Armoricaïn. Thèse de Docteur de l'ENSAR, 218 p. + annexes.
- DAIX C., 1991 - *Analyse du ruissellement en fonction de la dynamique spatiale des états de surface du sol : approche à l'échelle du bassin versant élémentaire en Pays de Caux*. Mémoire de fin d'études, ENITA Dijon, 45 p.
- DAMAY J, SOLAU J-L., 1990 - *L'érosion des sols cultivés en Picardie, Erlon (02). mise en place d'aménagements anti-érosifs*. Chambre d'Agriculture de l'Aisne. 21 p.
- DAROUSSIN J., KING D., 1996 – “Pedotransfer rules database to interpret the Soil Geographical Database of Europe for environmental purposes”. In *The use of pedo-transfer in soil hydrology research in Europe. Workshop proceedings*. Orléans, France. 10-12 octobre 1996, pp. 25-40.
- DEGEURCE B., 1988 - *La lutte contre l'érosion des terres, un combat de tous les jours*. Chambre d'agriculture de l'Oise, session de décembre 1988, pp. 24-36.
- DEGEURCE B., LUCE M., SOLAU J.L., DAMAY J., 1989 - *Guide pour la réalisation d'une étude préalable à la lutte anti-érosive : proposition de plan d'une étude type*. Chambre d'agriculture de Picardie.
- DELAHAYE D., 1988.- « L'érosion des sols en zones de cultures spécialisées ». In *Risques naturels et analyses pour une prévision, l'hiver 1987-1988 en Basse-Normandie*. CREGEPE. Université de Caen. pp. 4-5.
- DE PLOEY J., 1989 - *Soil erosion map of western Europe*. Published by CATENA. Laboratory of Experimental Geomorphology, Leuven, Belgium.
- DERANCOURT F., 1982 - *L'érosion des terres dans le secteur Canche-Authie : études réalisées, orientations du programme technique de lutte, approche des incidences économiques*.
- DERANCOURT F., 1994 - *Aménagements contre l'érosion des sols. Site d'étude du Tubersent*. Syndicat Intercommunal d'Aménagement de la Basse Vallée de la Canche. Chambre d'Agriculture du Pas-De-Calais. 25 p. + annexes.
- DERANCOURT F., 1994 - *Maîtriser l'érosion des sols, moyens agronomiques et hydrauliques à mettre en oeuvre*. Chambre d'Agriculture du Pas-de-Calais, 18 p.
- DEVAUD P., 1995 - *L'érosion des sols dans le département de la Somme*. Mémoire de DESS Environnement, aménagement, développement agricole. Agence de l'eau Artois-Picardie.
- DERVILLE I., 1994 - *Maîtrise de l'érosion et du ruissellement en région de grande culture dans le cadre du pré-SAGE Vexin-Thelle*. Mémoire de DEA national d'Hydrologie, juin 1994. 58 p.+ annexes + carte.
- DESCOTES A., MOMBRUN M.D., 1989 - « Comment protéger le sol des vignes contre l'érosion ? ». In *le vigneron champenois* n°3, pp.176-186.
- DESCOTES A., PERRAUD A., DURON B., 1991 - « Enherbement contrôlé du vignoble, une technique d'avenir ? » In *Le Vigneron champenois* n°3, pp.46-56.
- DESCOTES A., MONCOMBLE D., 1991 – « A propos de l'érosion des sols viticoles ». In *Le Vigneron champenois* n°3, pp. 36-45.
- DIDON E., 1990 - *Systèmes d'Information Géographique : concepts, fonctions, applications*. Laboratoire commun de télédétection, CEMAGREF/ENGREF, Montpellier, 44 p.
- DRESSAYRE E., 1986 - *L'érosion dans les coteaux du Lauragais*. Ecole nationale supérieure Agronomique de Toulouse, Chambre d'Agriculture de la Haute-Garonne. Mémoire de fin d'études, 105 p. + annexes.
- DUBUCQ M., 1983 - *Evaluation de l'érosion dans le Terrefort toulousain par photo-interprétation*. Mémoire de DEA n° 1094. FIAS. Université Paul Sabatier, Toulouse.

- DUBUCQ M., 1989 - *Identification et cartographie par télédétection des sols érodés : application au Lauragais Toulousain (Sud-Ouest France)*. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse, 247 p. + annexes.
- DUBUCQ M., DARTEYRE J.P., REVEL J.C., 1991 - « Identification et cartographie de surface, érosion et battance des sols du Lauragais à partir du croisement de données SPOT et d'un MNA ». *ITC journal*, 2, pp. 70-72.
- DOUAY F., 1980 - *Erosion des terres agricoles dans le Nord-Pas-de-Calais*. DEA de Pédologie. SRAE Université de Lille. 48 p. + annexes.
- DUBOIS C., 1994 - *La maîtrise du ruissellement par temps de pluie dans le bassin de la Somme*. Mémoire de DESS d'Aménagement Rural, Université Jules Vernes de Picardie. 84 p.
- DUCANGE M., 1995 - « Pneumatiques, adapter la pression aux types de travaux ». *Action Agricole Picarde* 10 mars 1995, p. 23.
- DUFOUR J., GRAVIER J., LARUE J.P., 1990 - « Fortes pluies et érosion des sols. L'orage de Mai 1988 dans la Sarthe ». *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, Paris 1990 - 2.
- DUROUSSET E., 1994 - *Pratiques sociales associées à l'érosion des sols viticoles et aux inondations en Saône et Loire*. Université. Paris X-Nanterre. 154 p. + annexes.
- DUVOUX B., 1990 - *Protection rapprochée des cours d'eau contre les effets de l'érosion des terres agricoles*. CEMAGREF. 86 p.
- Ecole supérieure d'Agriculture de Purpan, 1993 - *Gestion régionale sols et sensibilité à l'érosion. Mise au point d'une méthodologie basée sur les SIG*. 41 p.
- EIMBERCK M., 1990 - « Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : réflexions à partir du cas du Pays de Caux ». *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXV, n°1-2, pp 81-94.
- EIMBERCK M., BOIFFIN J., 1988 - *Convention INRA-SERDA de Haute-Normandie, Rapport d'activité 1987-1988, Mesures de ruissellement*.
- ESCOUROU G., 1980 - « Les fortes pluies de la bande côtière en Normandie ». *La météorologie* VI^e série, n°20-21, mars-juin 1980, pp. 295-298.
- ETCHANCHU D., N'DIAYE M., 1984 - *Etude pédologique. Etude Action de Développement : Lutte contre l'érosion*. PAR Caraman Lanta Verfeil, Chambre d'Agriculture de la Haute-Garonne, Association départementale de vulgarisation agricole SUAD - EDE, Laboratoire de Pédologie, Institut National Polytechnique. Rapport, 43 p.
- FAUCK R., 1994 - « Gestion de la ressource en eau : le problème de l'érosion des terres ». *C.R. Académie Agriculture Fr.*, 80, 4, pp. 3-14.
- FONTANNAZ D., 1993 - *Gestion régionale : sols et sensibilité à l'érosion. Mise au point d'une méthodologie basée sur les SIG*. Mémoire de DESS. Université Paul Sabatier, Toulouse III / Centre d'Etude spatiale de Rayonnement, Toulouse / Ecole supérieure d'Agriculture de Purpan.
- FORET M., 1990 - *Erosion des sols et catastrophes naturelles en Pays de vignoble : exemple de la Saône-et-Loire*. 28 p.
- GALEA G., RAMEZ P., 1995 : « Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau. guide à l'usage des aménageurs » CEMAGREF Etudes, *Gestion des milieux aquatiques* n° 10. Ed. CEMAGREF.
- GALLIEN E., LE BISSONNAIS Y., EIMBERCK M., BENKHADRA H., LIGNEAU L., OUVRY J. F., MARTIN P., 1995 - « Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé ». *Cahiers Agricultures*, 4, pp. 171-183.
- GRAVIER J., LARUE JP, VERAGUE J., 1990 *Erosion des sols et catastrophes naturelles : le cas du Bassin du Dué dans l'est du département de la Sarthe*. Secrétariat d'état auprès du Premier Ministre, chargé de l'Environnement, Délégation à la Qualité de la Vie, DDAF de la Sarthe, GEDEC (Equipe de recherches sur les risques naturels et les facteurs anthropiques) - Université du Maine. Mai 1990, 42 p.
- GRAZIANI CA., 1988 - « Erosion dei suoli agricoli nella CEE ». In *Ambiente, risorse e salute*, aprile 1988.

- GRIL J-J., DUVOUX B., 1991 - *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion : conditions d'adaptation des méthodes américaines*. CEMAGREF, 157 p.
- Groupement d'Intérêt Scientifique des Alpes du Nord, 1955 : *Pratiques agricoles et qualité de l'eau : risques, origines et actions de prévention dans le bassin Lémanique. Déterminisme et échelle de risque de ruissellement des parcelles de grande culture du Bas Chablais*. Compte rendu intermédiaire n°II, (document provisoire). Programme de recherche développement Alpes du Nord, GIS Alpes du Nord, (Secrétariat SUACI Montagne, Chambéry) , février 1995, 24 p.
- Groupe d'Etudes et de Recherche en Ecologie Appliquée, 1990.- *Impacts du défrichement dans le massif forestier des Landes de Gascogne*. Ministère de l'Environnement / ministère de l'Agriculture, 103 p.
- GUENNELON M., 1956 – « Contribution à l'étude de l'érosion des sols du Bas-Rhône. I Cas d'érosion sur vignoble dans le Gard ». *Annales agronomiques* (V, 1956), pp. 777-808.
- GUENNELON R., 1958 – « Contribution à l'étude de l'érosion des sols du Bas-Rhône. II. Sols sur sables miocènes et pliocènes dans le Vaucluse ». *Annales agronomiques* (IV, 1958), pp. 453-480.
- GUENNELON R., GILLY G. – « Les facteurs de l'érosion des sols dans la basse vallée du Rhône ». Extrait de la *publication de l'AIHS* n° 59, Commission érosion continentale, pp. 183-192.
- GUILBAULT P., 1992 - *Analyse des facteurs à l'origine de l'érosion par ruissellement concentré dans les sols limoneux du Nord de la France. Intérêt d'un aménagement par tassement du sol dans le talweg*. Mémoire de fin d'étude, ENSA Rennes, 50 p. + annexes.
- GUILLERM C., 1994 - *Diagnostic de l'érosion pluviale dans les rougiers de Camarès. Propositions de pratiques anti-érosives*. Mémoire de fin d'étude de l'ITIA 51 p.
- HELLUIN E., 1988.- « Le mouvement de terrain de février 1988 dans le Calvados ». In *Risques naturels et analyses pour une prévision, l'hiver 1987-1988 en Basse-Normandie*. CREGEPE. Université de Caen. pp. 8-9.
- HENENSAL P., 1986 - *L'érosion externe des sol par l'eau : approche quantitative et mécanismes*. Rapport de recherche LPC n°138, 76 p.
- HENIN S., GOBILLOT T., 1950 - « L'érosion en France ». *Bulletin Technique d'Information*, 50, pp. 431-433.
- HOEBLICH J.M. et SCHWING J.F., 1977 - *L'érosion dans le vignoble de moyenne Alsace : exploitation en vue de l'aménagement*. Mémoire de maîtrise ULP Strasbourg, 79 p. + annexes.
- ICONA, 1988 - *Mapas de estados erosivos*, Madrid, Instituto nacional para la Conservacion de la Naturaleza, ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion.
- INA, 1986 - *Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux*. vol.1, 153 p., vol.2, 65 p.
- INRA, 1976 - *Les bocages : histoire, écologie, économie*. Table ronde CNRS Rennes, juillet 1976.
- INRA SESCOF, Conseil régional de la région Nord-Pas-De-Calais, 1991 - *Evaluation spatiale de la sensibilité à l'érosion hydrique des terres agricoles de la région Nord-Pas-de-Calais*. Orléans, 208 p.
- JAMAGNE M., 1993 - « Connaissance des sols et fragilité écologique ». *C.R. Académie Agriculture Fr.* 79, 5, pp. 77-88.
- JAMAGNE M., HARDY R., KING D., BORNAND M., 1995 - « La base de données géographique des sols de France ». In *Etude et gestion des sols*, 2, 3, pp. 153-172.
- KEIME M.P., 1991 - *Etude des sites du Roussillon. Etat d'avancement*. BRGM. Services Sol et Sous-Sol, département environnement et risques, Orléans, Juin 1991 (Réf. R 32 859), 48 p.
- KESSLER J., CHAMBRAUD A., 1986.- *La météo de la France : tous les climats localité par localité*. Ed. J.C. Lattès, 312 p.

- KING C., AUMONIER F., HOLE J.P., 1988. - *Application régionale de la télédétection. Le Pays d'Ouche. Eure. Sols sensibles à l'érosion et turbidité aux captages*. BRGM.
- KING C., HOLLE JP, AUMONIER F., 1990 – « Sols sensibles à la battance et turbidité aux captages : application régionale de la télédétection en pays d'Ouche ». *Hydrogéologie* 90,2, pp. 129-138.
- KING D., HARDY M., LE BISSONNAIS Y., 1991 - *Evaluation spatiale de la sensibilité à l'érosion hydrique des terres agricoles de la région Nord-Pas-de-Calais*. INRA, Conseil régional de la région Nord-Pas-de-Calais, 208 p.
- KING D., LE BISSONNAIS Y., 1992 - « Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe ». *C.R. Académie Agriculture Fr.*,78, n°6, pp. 91-105.
- KING D., PAPY F., DAIX C., 1992 - *Ruissellement et dynamique spatiale des états de surface de trois bassins versants élémentaires du Pays de Caux*. Symposium International : Erosion des terres agricoles en milieux tempérés. Saint-Cloud.
- LAMBERT R., 1975 - *Recherches hydrologiques dans le sud-est du bassin Garonnais*. Thèse de doctorat d'état, Université Toulouse-le-Mirail.
- LANDON P., 1988 - « La lutte contre l'érosion dans les bassins versants ». *Série Recherche et développement*. n°1, février 1988.
- LANE L.J., RENARD K.G., FOSTER G.R., LAFLEN J.M., 1992 - "Development and application of modern soil erosion prediction technology : the USDA experience". *Australian Journal of Soil Research*, 30, pp. 893-912.
- LARUE, 1992 - « L'érosion des sols cultivés dans la région de la Flèche. Le rôle de l'évolution du paysage rural et des façons culturales ». GEDEC, Université du Maine. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, Paris, 1992 - 2.
- LARUE J.P., 1995 - « Contribution à l'étude morphodynamique des vallons Sarthois (Bassin Parisien, France), au quaternaire récent ». GEDEC Université du Maine. In *Norais*, 1995, Poitiers, tome 42, n°166, pp. 389-404.
- LAVAL F., FRILEUX H., 1991 - *Réaménagement hydraulique d'un bassin hydrographique soumis à l'érosion. Propositions techniques et coûts. Etude du bassin de Mauconduit*. Rapport de stage. Agence de l'eau Seine-Normandie, délégation de Haute-Normandie. AREAS. 30 p. + annexes.
- LE BER F. (1989) - *Essai dévaluation de la sensibilité à l'érosion dans le Nord du Bassin Parisien. Prise en compte des caractéristiques des systèmes agraires*. DEA INA/PG, Université PARIS XI. INRA Laon. 34 p.
- LE BISSONNAIS Y., 1988 - *Analyse des mécanismes de dégradation et de modélisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse Université d'Orléans. 216 p.
- LE BISSONNAIS Y., LE SOUDER C., 1995 – « Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion ». *Etude et Gestion des Sols*, 2, 1, pp. 43-56.
- LE BISSONNAIS Y., H. BENKHADRA, V. CHAPLOT, E. GALLIEN, M. HEMERCK, D. FOX, P. MARTIN, L. LIGNEAU, J.-F. OUVRY 1996 - « Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse des sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au versant ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. 3, p. 51-64.
- LE BISSONNAIS Y., ARROUAYS D., 1997 - "Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : application to humic loamy soils with various organic carbon contents". In *European Journal of Soil Science*, march 1997, p 39-48.
- LÉBOULANGER T., 1992 - *Caractérisation de la turbidité de quatorze points de prélèvement d'AEP de Haute-Normandie*. Rapport de synthèse, Université de Rouen, Agence de l'Eau de Seine-Maritime, 40 p. + annexes.

- LECHEVALIER C., 1987 - *Lutte contre l'érosion des terres et les inondations. Influence de l'évolution du paysage sur 3 sites tests du département : St-Valéry-en-Caux, Criel-sur-Mer, Mélicamp*. CAUE. 45 p. + cartes.
- LECHEVALIER C., 1991 - « L'érosion des terres agricoles en Pays de Caux ». *Cahiers Géographiques de Rouen, Etudes Normandes*, 1, pp. 97-116.
- LE DAIN A.Y., 1988 - *L'érosion dans le vignoble languedocien*. Ministère de l'Environnement / ministère de l'Agriculture, Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement (Montpellier). Mai 1988, 69 p. + annexes.
- LEDUC B., 1995 - « Remembrements et inondations », *Action Agricole Picarde*, 10 février 1995. p. 6.
- LEFEVRE P., 1958 - « Quelques phénomènes d'érosion en Picardie ». *Annales agronomiques* 1. pp. 91-129.
- LEVY G., 1985 - *Un cas d'érosion des sols catastrophique dans le vignoble de moyenne Alsace. Exploitation en vue de l'aménagement*. Université Louis Pasteur, INRA de Colmar. Mémoire de maîtrise, 79 p. + annexes.
- LILIN C., PAULET B., 1987 - « L'érosion des sols cultivés en France : développement actuel et actions entreprises ». *BTI*, 417, pp. 71-89.
- 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.
- LORE A., MAGALDI D., 1995 - « Valutazione del rischio di erosione del suolo : un esempio in Provincia dell'Aquila ». *Quaderni di scienza del suolo*, vol. VI, pp. 5-18.
- LOSSEAU P., 1991 - « A Vironchaux, on lutte contre l'érosion », *Horizon 2000*, n°73, janvier 1991, pp. 20-21.
- LUCE M., 1988 - « L'érosion, un mal qui nous guette », *Horizon 2000*, n°44, août 1988, pp.14-15.
- LUCE M., 1988 - « L'érosion des sols, des dégâts », *Horizon 2000*, n°48, décembre 1988, pp. 20-22.
- LUCE M., 1989 - « Le parcellaire et les risques d'érosion ». *Horizon 2000*, n°57, septembre 1989, pp.14-15.
- LUCE M., 1993 - « Erosion, une année critique », *Horizon 2000*, n°100, avril 1993, pp.16-18.
- LUCE M., SOLEAU J.L., 1995 - « L'assollement concerté, une solution pour limiter l'érosion des sols », *Action Agricole Picarde*. 25 août 1995, p. 29.
- LUDWIG B., 1992 - *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg I, 201 p.
- MARTIN P., 1997 - *Pratiques culturelles, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du nord ouest de l'europe*. Thèse Université Paris-Grignon, 184 p. + annexes.
- MATHIEU C., GAY M., SANCHEZ E., 1993 - « Evaluation de la fertilité des sols en Midi-Pyrénées : une approche cartographique pour mieux valoriser les analyses de terre ». In *la gestion des sols pour une agriculture durable*, Ecole supérieure d'Agriculture de Purpan, Toulouse. n°166, janvier-mars 1993, pp. 28-36.
- MAUCORPS J., 1987 - « Estimation spatiale des risques de dégradation physique des sols dans le Nord-Pas-de-Calais ». *Terres et Hommes du Nord*. 4, pp. 221-224.
- MAILLARD A., VACHERON C., PERROTTET-MULLER J., 1990 - « Lutte contre l'érosion du sol en grandes cultures par le semis sous litière : résultats d'essais dans la pratique avec le maïs et la betterave sucrière ». *Revue suisse d'Agriculture*, 22 (4), pp. 215-226.
- Ministère de l'Agriculture, 1980 - « Bocage et aménagement rural, quel avenir ? » *Bulletin technique d'information du ministère de l'Agriculture*, octobre-novembre n°353-355.

- MIOUZE C., VIVET M., GUILLIN J.C., 1991 - « Analyse des coefficients d'écoulement des petits bassins versants ruraux en vue de prédéterminer les débits de crue ». *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*. n°171. pp. 103-116
- MEYNIER A., 1961 - « Glissements de terrain dans le bassin permien de Brive ». *Revue de géomorphologie dynamique*. XXII^e année, n°2, pp. 130-136.
- MONNIER G., BOIFFIN J., PAPY F., 1986 - « Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest » *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXII, n°2, pp. 123-131.
- MOREL R., 1989 - *Les sols cultivés*. Techniques & Documents, Lavoisier ed., 373 p.
- MORFAUX P., 1989 - « Glissement et érosion des sols champenois ». In : *Le Vigneron champenois* n°10, pp. 546-568.
- NEBOIT R., 1983 - *L'homme et l'érosion*. Publication de la faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université de Clermont-Ferrand II, fascicule 17, 183 p.
- NEYROUD J.A., 1990 - « La sensibilité spécifique du sol à l'érosion ». *Revue Suisse d'Agriculture*, vol. 22, n°4, pp. 207-213.
- Organisation et Environnement, 1987 - *Erosion des terres agricoles et aménagement foncier dans le Pays de Caux*. Rapport ministère de l'Environnement / ministère de l'Agriculture, 29 p.
- OUVRY J-F., 1982 - *Localisation et description des sites d'érosion des sols agricoles du bassin inférieur de l'Yères (Seine-Maritime)*. Mémoire ENSAR, SDS 286. Septembre 1982. 69 p.
- OUVRY J-F., 1986 - *Opération régionale de lutte contre les inondation et l'érosion des sols. Volet 1: Ruissellement et érosion des terres agricoles*. Synthèse des travaux et éléments de réflexion, campagne 1985-1986. AREAS, 74 p. + annexes.
- OUVRY J-F., 1987 - *Ruissellements, inondations, érosion. Pour une lutte plus économique et plus efficace*. AREAS, 24 p.
- OUVRY J-F., 1988 - *Opération relative à la lutte contre les inondations et l'érosion des terres agricoles en Haute-Normandie*. Rapport d'activité AREAS, campagne 1987-1988.
- OUVRY J-F., 1990 - « Protéger la terre contre le ravinement ». *l'Agriculteur Normand*, 22 février, p.13.
- OUVRY J-F., 1990 - « Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrain à l'érosion par ruissellement concentré : expérience du Pays de Caux (France) ». *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXV, n°1-2, pp. 157-169.
- OUVRY J-F., 1992 - *Graimbouville : propositions d'aménagements pour lutter contre l'érosion des terres et les inondations*. AREAS, 20 p. + tableaux et cartes.
- 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 ; pp.107-113.
- OUVRY J-F., LIGNEAU L., 1993 - *Cartographie régionale des zones sensibles à l'érosion en vue de l'application des mesures agri-environnementales*. Région Haute-Normandie. AREAS, 3 p. + cartes.
- PAPY F., BOIFFIN J., 1988 - « Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II - Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles ». *Agronomie*, 8 (9), pp. 745-756.
- PAPY F., 1991 - *Effets des structures agraires sur l'érosion hydrique et le ruissellement*. Collection de l'Association des Géographes Français, Influence des modifications de structures agraires sur l'érosion des terres, Saint-Cloud, 12 p.
- PAPY F., 1991 - « Agriculture et environnement : des éléments de réflexion ». *BTI*, 8, pp. 2-11.
- PAPY F., DOUYER C., 1988 - *Les déterminants des catastrophes liées au ruissellement des terres agricoles en Pays de Caux*. INRA-SERDA. 44 p.
- PAPY F., DOUYER C., 1991 - « Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques ». *Agronomie*, 11 (3).

- PAPY F., POUJADE C., SOUCHERE V., 1992 - « Maîtrise du ruissellement et de l'érosion sur un territoire agricole : le double découpage de l'espace ». In Buche P., King D. and Lardon S. (Eds.). *Gestion de l'espace rural et système d'information géographique*, INRA, 421 p.
- PATTY, GRIL (CEMAGREF), REAL, MASSON (ITCF), DABENE (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche), 1994 - « Dispositifs enherbés, des possibilités pour préserver la qualité des eaux superficielles » *Perspectives Agricoles*, n°196, novembre 1994, pp. 90-95.
- PENVEN M.J., T. MUXART, D. BRUNSTEIN., 1993 - *La qualité des eaux dans les unités spatiales fonctionnelles d'ordre inférieur. Les matières en suspension et leur origine : premiers résultats*. Rapport technique PIREN-SEINE, 74 p.
- PELLET V., 1993 - *Ruissellement, érosion, transfert de pesticides sur les coteaux viticoles et arboricoles de Rhône-Alpes. Vers une approche globale de la gestion de l'eau et des sols ?* Mémoire de fin d'études ENGREF, ENVIRHONALPES (Agence régionale pour la Qualité et la gestion de l'Environnement).
- PERNY A., 1985 - « Sud-Ouest, plus d'un million d'hectares menacés ». *Cultivar, spécial sol et sous-sols*. 184: pp. 41-43.
- PERNY A., BOSC P., 1980 - « L'érosion sur les coteaux du Sud-Ouest ». In *La France Agricole*, 14 novembre 1980. pp. 37-39.
- PEYRE Y., 1982 - *L'érosion par l'eau*. Techniques Agricoles, 1385, 16 p.
- PIHAN J., 1979 - *Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France*. Colloque sur l'érosion agricole en milieu tempéré non méditerranéen, Strasbourg, 20 - 23 Septembre 1978, pp. 13-18.
- PILLEBOUE J., VERDIER J., 1977 - « Inondations en Gascogne (juillet 1977) et aménagement de l'espace ». *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, tome 49, 3. pp. 375-400.
- PINGUET A., 1985 - *Aperçu sur la pluviométrie en Pays de Caux*. Document interne bioclimatologie, INRA Avignon.
- POMMIER O., 1995 - *L'aménagement des parcelles contre l'érosion dans le vignoble champenois : description des techniques et perspectives de développement*. Mémoire de DESS, Université de Bourgogne, Agence de l'eau Seine-Normandie. 57 p. + annexes.
- RAMEZ P., KELLAL M., 1994 - « Production et transfert de sédiment à l'échelle du bassin versant ». *C.R. Académie Agriculture Fr.*, 80, 4, pp. 15-23.
- REVEL J.C., COSTE N., CAVALIE J., COSTES J.L., 1990 - « Premiers résultats expérimentaux sur l'entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le Terrefort Toulousain ». *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol XXV, n°1-2, pp.111-118
- REVEL J.C., ROUAUD M., 1985 - « Mécanismes et importance des remaniements dans le Terrefort Toulousain (Bassin Aquitain, France) ». *Cahiers de Pédologie* XXXV-2, pp.171-189.
- REVILLION P.Y., 1984 - *Le problème de l'érosion des terres agricoles dans le Lauragais (Haute-Garonne). Dossier préliminaire à caractère méthodologique et pédagogique*. Bureau du Développement de la Production Agricole, ministère de l'Agriculture (ENGREF) et Secrétariat d'Etat à l'environnement et à la Qualité de la Vie. 31 p.
- ROCHE M., 1963 - *Hydrologie de surface*. Gauthier-Villars (ed.), pp.143-172.
- ROUAUD M., 1987 - *Evaluation de l'érosion quaternaire des remaniements de versant et de l'érosion en rigoles dans le Terrefort Toulousain*. Thèse 3ème cycle Université Paul Sabatier, Toulouse, 320 p.
- SABA EL-GHOSSAIN T., 1977 - *Erosion dans le vignoble alsacien*. Thèse ULP Strasbourg, 107 p. + annexes.
- SAGUEZ F., 1991 - *Rationalisation des aménagements hydrauliques et lutte contre l'érosion et le ruissellement en coteau viticole*. Mémoire de DESS, Université Paris VII, 98 p.
- SALLENAVE M., 1987 - « Le prix de la terre. Approche économique de l'érosion dans le vignoble champenois ». *Génie rural* n°5-6, mai-juin 1987.

- SEBILLOTTE M., 1968 – « Stabilité structurale et bilan hydrique du sol : influence du climat et de la culture ». *Annales Agronomiques*, 19 (4), pp. 403-414.
- SOGON S., PENVEN M. J., BONTE P., MUXART T., 1999 - “Estimation of sediment yield and soil loss using suspended sediment load and ¹³⁷Cs measurements on agricultural land, Brie Plateau, France”. *Hydrobiologia* 410, pp. 251-261.
- SOLTNER D., 1992 - *Les bases de la production végétale, Météorologie, Pédologie, Bioclimatologie : chapitre 6, dégradation et conservation des sols*, tome 2, 6ème édition, pp.183-243.
- SOUADI T., KING C., BOURGUIGNON A., MAURIZOT P., DENIS L., LE BISSONNAIS Y., SOUCHERE V., LECOUR A., 2000 – *Cartographie régionale de l'aléa « érosion des sols » en région Haute-Normandie*. BRGM – INRA, rapport BRGM, octobre 2000.
- SOULIER, M.-C., 1995 - *Les mouvements de terrain de janvier et février 1994 dans l'Yssandonnais (Corrèze) et leur impact sur les activités humaines*. Mémoire de maîtrise, Université de Limoges, 137 p.
- VAN DER KNIJFF J.M., JONES R.J.A, MONTANARELLA L., 2000 - *Soil erosion risk assessment in Europe*. European Soil Bureau, Joint Research Centre, Space Applications Institute.
- VEYRET Y., ARNOULD P., BOUCHOT B., HOYTAT M., WICHEREK S., 1987 - *L'érosion des sols en France. Manifestations, Coûts, Remèdes, Cartographie, perspectives de recherches. Bilan bibliographique à partir de travaux récents*. Université Paris VII. Travaux du laboratoire de géographie physique. n°16-1987. 54 p.
- VIGUIER J.M., OLIVEROS C., BERNARD R., 1990 - *Erosion des vignobles dans les Côtes de Provence (Vidauban-France). Mesures et interprétations*. BRGM, département Environnement et Risques de Marseille et d'Orléans, Chambre d'Agriculture du Var.
- VIGUIER J.M., OLIVEROS C., BERNARD R., post-1990 - *Erosion des vignobles dans les Côtes de Provence (Vidauban-France). Mesures et interprétations*. BRGM, département Environnement et Risques de Marseille et d'Orléans, Chambre d'Agriculture du Var.
- VOGT J., 1953 - « Erosion des sols et techniques de cultures en climat tempéré maritime de transition (France et Allemagne) ». *Revue de géomorphologie dynamique*. tome 4. pp. 157-183.
- VOGT J., 1970 - « Un bel exemple d'érosion historique des sols dans le nord de la Plaine d'Alsace ». *Bulletin de l'association philomatique d'Alsace et de Lorraine*. Tome 4, pp. 53-55.
- VOGT J., 1974 - « Exemples d'érosion catastrophique dans le vignoble Alsacien au XVII^e siècle (Marlenheim et Mutzig) ». *Revue d'Alsace*, tome 104, pp. 95-96.
- VOGT J., 1989. *L'érosion historique des sols et sa prise de conscience dans l'est du bassin de Paris*. 24 p.
- WISCHMEIER W. H., 1976 - *Use and misuse of the universal soil loss equation*. Journal of soil and water conservation, 31 (1), pp. 5-9.
- WISCHMEIER W. H., SMITH D. D., 1978 - *Predicting rainfall erosion losses : a guide to conservation planning*. USDA Handbook, 537, 58 p.
- X - Les sols malades de l'érosion. Agriculteur, ton capital fout le camp ! Brochure réalisée par la Chambre régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées et la Chambre Départementale d'Agriculture.

GLOSSAIRE

Aléa (naturel) : probabilité qu'un événement naturel se produise, pour un lieu ou une région.

Battance : elle provient de la désagrégation des structures de surface et consiste en la formation, à la surface du sol, de structures appelées croûtes de battance : on distingue les croûtes structurales qui sont le produit d'une réorganisation de la structure superficielle et d'une fermeture de la porosité de surface ; et les croûtes sédimentaires, qui résultent de dépôts lités successifs de sédiments dans les flaques apparues suite à un excès d'eau.

La sensibilité des sols à la battance est fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques, et en particulier de leur teneur en argile, en matière organique, en oxydes de fer et en cations dispersants.

Capacité d'infiltration : ou « infiltrabilité » des sols. C'est la quantité maximum d'eau qui s'infiltre dans le sol au temps « t ». Elle dépend des constituants et de l'arrangement de la porosité du sol. Elle varie dans le temps en fonction de l'état de saturation du sol.

Détention superficielle : voir rétention en eau à la surface.

Dérayure : espace libre qui sépare deux planches de labour. Par extension, ce terme désigne le dernier sillon creusé lors d'un labour qui, n'étant pas encore recouvert, constitue un chemin de circulation des eaux superficielles.

Désagrégation : processus de fragmentation du sol qui se fait par différents mécanismes et qui affecte différents niveaux de la structure du sol depuis les interactions des particules d'argile jusqu'aux mottes de terre. Les principaux mécanismes de désagrégation sont la dispersion physico-chimique, l'éclatement par piégeage d'air, la fissuration gonflement/retrait et la désagrégation mécanique par impact des gouttes.

Erodibilité : c'est la sensibilité des sols ou des matériaux superficiels à être emporté par le ruissellement. Cette sensibilité est très liée à la stabilité structurale, mais elle dépend aussi de l'état physique de la surface : tassement, travail du sol, battance...

Erosion diffuse, érosion concentrée : l'érosion désigne un processus de détachement et de transport de matières solides. Il désigne aussi le bilan d'exportation de matière par unité de surface. Les transports, s'ils sont liés à l'eau, se font :

- soit sous forme d'une lame d'eau répartie de façon quasi-uniforme à la surface du sol, on parle alors d'érosion diffuse ;
- soit de façon localisée, dans des rigoles ou des chenaux, on parle alors d'érosion concentrée.

Fourrière : zone en bordure de parcelle que l'agriculteur utilise pour effectuer ses demi-tours, et qui est travaillée perpendiculairement au sens principal de travail du sol.

Modèles physiques ou déterministes : ils tendent à reproduire les processus réels du ruissellement et de l'érosion, en formulant les étapes en totalité ou en partie. La modélisation reste toutefois toujours d'une grande simplicité par rapport à la réalité.

Modèles statistiques ou empiriques : ils établissent une loi mathématique reliant la variable de sortie à des variables d'entrée, dont la forme et les coefficients sont calés sur le terrain. Ce calage est effectué empiriquement en ajustant les valeurs calculées par le modèle aux valeurs mesurées.

Mulch : couverture du sol par des résidus de végétaux.

Rétention en eau à la surface : la microtopographie créée à la surface du sol des bosses et des creux qui définiront le lieu d'apparition des flaques, avant que le ruissellement ne démarre. Le volume représenté par l'ensemble de ces flaques remplies à leur maximum constitue la rétention à la surface.

Ruissellement : le ruissellement est l'écoulement par gravité de l'eau à la surface du sol.

CREDITS PHOTOGRAPHIQUES

(AREHN) Agence régionale de l'environnement
de Haute-Normandie
Cloître des Pénitents
8 allée Daniel-Lavallée, 76000 Rouen.
Tél. : 02.35.15.78.00
Fax : 02.35.15.78.20
Mail : arehn@wanadoo.fr

Cécile BARDET
Société SIGMAP
1 avenue du chemin neuf
13114 Puyloubier
Tél./fax : 04 42 66 35 70
Email : sigmap@club-internet.fr

Christophe CUDENNEC
Ecole Nationale Supérieure Agronomique de
Rennes
Département Sciences de l'Ingénieur,
Laboratoire de Physique des Surfaces Naturelles
et Génie Rural
65 rue de St Briec
CS 84215
35042 Rennes Cedex France
Tél. : 02 23 48 55 58
Fax : 02 23 48 56 99
Email : cudennec@agrorennes.educagri.fr

Jean Claude DOUYER
DRAF Haute-Normandie
2 rue Saint-Sever
Cité administrative
76032 Rouen Cedex

Yves LE BISSONNAIS
INRA, Unité de science du sol
Avenue de la Pomme de Pin
B.P. 20 619, Ardon
45166 Olivet Cedex.
Tél : 02 38 41 78 82
Fax : 02 38 41 78 69
Email : lebisson@orleans.INRA.fr

Yves NEDELEC
Cemagref - Groupement d'ANTONY
Unité Ouvrages pour le drainage et
l'étanchéité
BP 44, 92163 Antony Cedex
Tél. : 01 40 96 60 58
Fax : 01 40 96 62 70
Email : yves.nedelec@antony.cemagref.fr

Sébastien Salvador-Blanes
INRA, Unité de science du sol
Avenue de la Pomme de Pin
B.P. 20 619, Ardon
45166 Olivet Cedex.
Tél. : 02 38 41 78 34
Fax : 02 38 41 78 69
Email : Sebastien.Salvador@orleans.inra.fr

ANNEXE 1

Méthode d'intégration de l'aléa par USI

L'intégration automatique des aléas par USI est réalisée à l'aide d'une règle de décision prenant en compte les pourcentages de surfaces de chaque classe d'aléa dans l'USI. Les seuils de pourcentages de chaque classe à partir desquels est affecté une certaine valeur d'aléa ont été choisis à partir de l'analyse des résultats du modèle.

Le tableau ci-dessous résume la méthode utilisée par la règle de décision et les seuils d'aléas utilisés pour l'intégration.

Ordre de priorité	Pourcentage de surface de l'aléa dans l'USI	code de l'aléa affecté à l'USI
n° 1	aléa 1 > 88% ou aléa 45 < 1% ou aléa 345 < 5%	très faible
n° 2	villes > 50%	zones urbaines
n° 3	espaces ouverts > 21%	haute montagne
n° 4	surfaces en eau > 44%	zones humides
n° 5	sans information > 20%	pas d'information
n° 6	aléa 5 < 7% ou 2% < aléa 45 < 12% ou 6% < aléa 345 < 20% 8% < aléa 5 < 11% ou 13% < aléa 45 < 20% ou 21% < aléa 345 < 28% 12% < aléa 5 < 17 % ou 21% < aléa 45 < 28% ou 29% < aléa 345 < 39% aléa 5 > 18% ou aléa 45 > 29% ou aléa 345 > 40%	faible moyen fort très fort

Code de l'aléa

aléa 1 = aléa très faible

aléa 45 = aléa fort + aléa très fort

aléa 345 = aléa moyen + aléa fort + aléa très fort

aléa 5 = aléa très fort

Ordre de priorité : lorsqu'une USI peut prendre plusieurs valeurs d'aléa, c'est l'aléa correspondant à l'ordre de priorité le plus fort qui est retenu. Pour l'ordre de priorité 6, c'est l'aléa le plus fort qui est retenu en cas de possibilité multiple.

Pourcentage de surface de l'aléa dans l'USI : le modèle considère les pourcentages de surfaces des codes 1, 5, 4+5, 3+4+5, des villes, des espaces ouverts, des surfaces en eau, et des surfaces non informées.

Aléa affecté à l'USI : pour les ordres de priorité 1 et 6, au moins une des trois possibilités doit être réalisée pour que le code de l'aléa soit affecté.

Exemple : l'aléa 5 est affecté à l'USI si l'aléa 5 est supérieur à 18%, ou si la somme des aléas 4+5 est supérieur à 29%, ou si la somme des aléas 3+4+5 est supérieur à 40%.

Ainsi, l'aléa intégré par unité spatiale sera très fort dans un des cas suivants :

- l'intensité de l'aléa est très forte pour un petit nombre de pixels (>18%),
- un nombre important de pixels présentent un aléa au moins moyen (40%) ou fort (29%).