

Méthode d'identification de zones prédisposées aux émissions et aux transferts particuliers.

Application à une zone d'élevage bovin intensif dans le bocage sud-Manche

Francis Macary^a et Julien Paulais^b

Un rappel de quelques concepts essentiels en matière d'érosion hydrique et de ruissellement est présenté en annexe, à la fin de cet article.

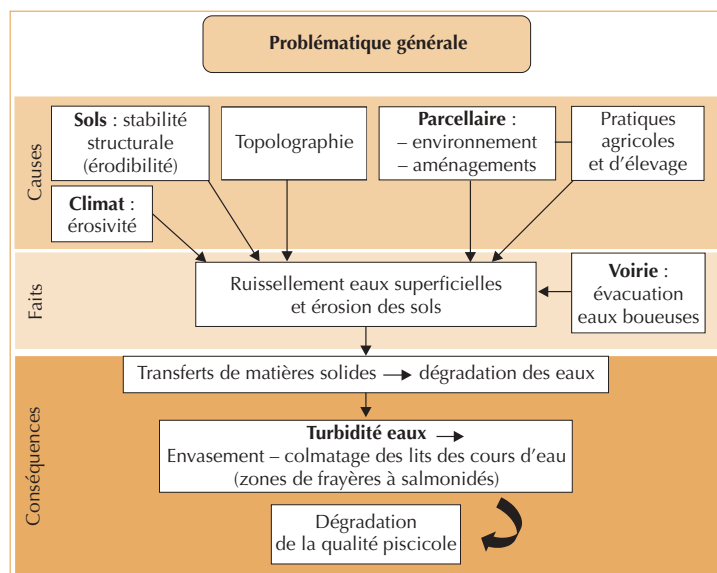
Le transfert des particules de terre soustraites aux sols agricoles sous l'effet des différentes formes d'érosion, peut avoir des conséquences néfastes sur la vie aquatique, particulièrement au niveau des frayères. Les auteurs présentent dans cet article la mise en œuvre dans une région bocagère d'une méthode d'identification des zones sources de particules et de transferts. Outre une cartographie des sources émettrices, cette méthode a permis de hiérarchiser les risques et de mieux cerner les mesures préventives et curatives adaptées.

La modification de la gestion de l'espace agricole et l'intensification des pratiques culturales, associées à des conditions climatiques et pédologiques particulières, conduisent à une accentuation des phénomènes d'érosion hydrique, débouchant sur une altération de la qualité des eaux superficielles (Cros-Cayot, 1996). Cette dégradation provient notamment de l'augmentation de la charge en matières en suspension (MES) traduite par une turbidité excessive des zones de fraie des poissons. Il s'ensuit une diminution de la population des poissons constatée au fil des années (Baglinière, Marchand, 2002). Toutefois, on réalise rapidement que les

relations entre pluviométrie, morphologie du bassin versant, réseau de haies, cycles agronomiques, cycle hydrologique et flux de matières sont mal connus. Les conséquences de l'érosion des berges et de l'accès des animaux aux ruisseaux, font l'objet d'approches scientifiques, ainsi que les modifications des pratiques culturales au niveau de l'aménagement des bassins (figure 1).

Faire progresser la connaissance de tels mécanismes bio-physiques, constitue l'un des objectifs en terme de projets de recherche d'une action scientifique nommée *Aquae*¹, initiée par le Cemagref et l'INRA². L'un de ces projets, mené dans deux

1. *Aquae* est une action scientifique structurante Cemagref/INRA ayant pour objectif le développement de connaissances dans les relations entre les systèmes terrestres et les hydrosystèmes.
2. INRA – Institut national de la recherche agronomique.



▲ Figure 1 – Problématique générale du projet Aquae-Oir.

Les contacts

a. Cemagref, UR Agriculture et dynamique de l'espace rural, 50, avenue de Verdun, 33612 Cestas Cedex
b. Stagiaire Cemagref, DESS Espace et milieux, université Paris VII Diderot

3. ENSAR – École nationale supérieure agronomique de Rennes.

zones d'élevage (Isigny-le-Buat, dans la Manche et Thonon-les-Bains, en Haute-Savoie), a pour but de mettre en relation la dégradation observée de la qualité piscicole de cours d'eau traditionnellement réputés pour leur richesse en espèces de salmonidés, avec la gestion de l'espace agricole et ses mutations récentes. Un sous-projet bas-normand associe le Cemagref, l'INRA et l'ENSAR³, et s'intéresse plus particulièrement aux effets de la gestion des bassins versants sur les transferts particuliers, et à leur impact sur la qualité biologique des cours d'eau du bassin de l'Oir.

L'hypothèse retenue dans cette étude est que les flux de MES jouent un rôle important dans la diminution des populations piscicoles par colmatage des frayères. Il importe donc d'évaluer avec précision l'impact de certaines pratiques anthropiques, afin de fournir des indicateurs et des méthodes pour développer sur des bases scientifiques, des réponses en terme de politique agricole et d'aménagement. Au sein de cette approche pluridisciplinaire, l'unité ADER (Agriculture et dynamique de l'espace rural) du Cemagref de Bordeaux étudie les modalités de gestion de l'espace agricole dans les deux bassins versants retenus, afin d'identifier les parcelles émettrices de particules pouvant parvenir aux ruisseaux.

Pour avancer dans cette identification, nous avons développé une démarche en deux phases. La première a consisté en l'acquisition des objets nécessaires et à la mise en place des outils de traitement : SGBD (système de gestion de base de données) et SIG (système d'information géographique). Au cours de la seconde, une analyse de type multicritère a permis de discriminer ces zones potentiellement émettrices. Afin d'assurer une meilleure lisibilité, les résultats sont présentés sous forme cartographique pour chaque bassin versant.

Dans cet article, après un rappel de nos objectifs d'identification des sources émettrices de particules, nous expliquons notre démarche d'analyse multicritère pour identifier les parcelles émettrices de particules. Nous commenterons ensuite les résultats de notre classement des parcelles, puis nous aborderons quelques solutions préventives et curatives.

Objectifs et contexte de l'étude

Objectif : identifier les zones sources de particules

Le projet s'est donné pour objectif d'analyser les incidences des pratiques culturales, des activi-

tés d'élevage et des aménagements divers sur le peuplement en salmonidés et leur évolution dans les cours d'eau sur des zones ateliers. Il s'agit notamment de comprendre le déterminisme sur les bassins versants du transfert des matières en suspension par les eaux de surface vers ces cours d'eau, en fonction des conditions hydro-climatiques et géomorphologiques.

Au sein de ce projet, notre objectif a d'abord consisté à connaître très précisément les activités anthropiques liées à la gestion de l'espace rural dans les deux bassins versants, grâce à des enquêtes de terrain auprès de tous les acteurs locaux concernés : agriculteurs, coopérative et négoce, chambre d'agriculture, DDAF, DDE, élus.

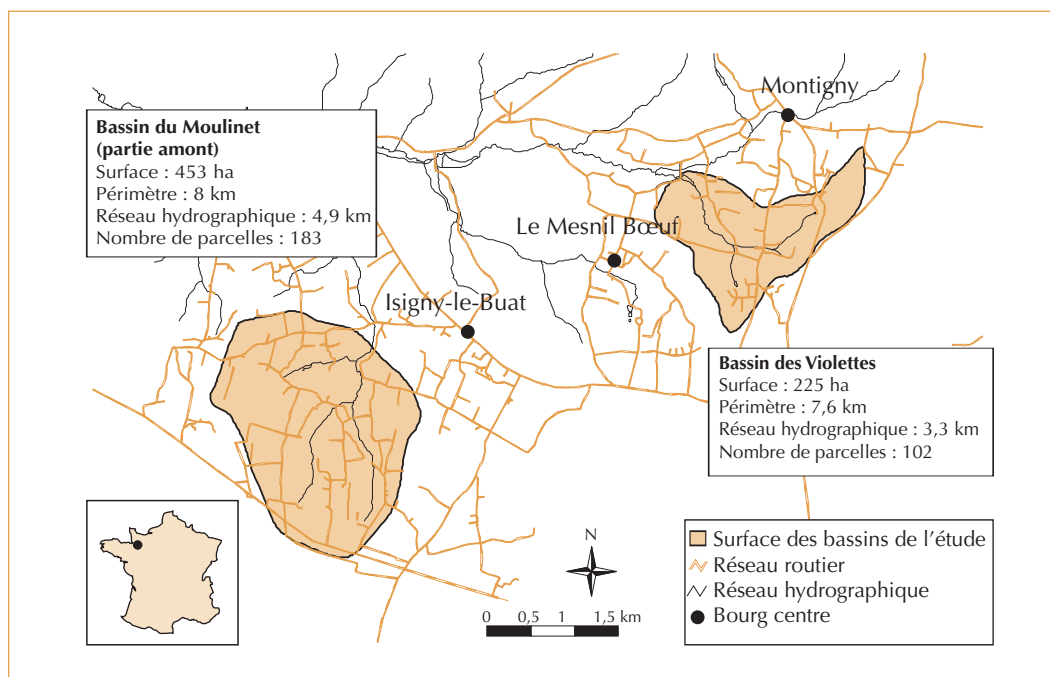
Puis nous avons cherché à discriminer les parcelles à fort potentiel en matière d'érosion, et de transfert des particules en suspension, afin de pouvoir intégrer ces informations dans le travail effectué par les équipes de Rennes, au niveau de l'analyse de ces particules et de leur modélisation hydrologique.

Au final, l'étude de la topographie des bassins versants, de la distribution des parcelles agricoles et de leur connectivité avec les ruisseaux, ainsi que des pratiques agronomiques et de l'élevage, sont autant d'éléments à prendre en compte dans l'analyse spatiale des structures paysagères et des pratiques agricoles, en vue de comprendre le transfert des matières particulières dans les cours d'eau (Boiffin *et al.*, 1988 ; Ludwig, 2000 ; Papy, 1992).

Un contexte local favorable aux phénomènes de ruissellement et d'érosion

Notre zone d'étude a été choisie dans le bassin de l'Oir, dans le sud-Manche, zone d'élevage laitier intensif marquée par de profonds bouleversements de l'espace rural. Elle comprend deux petits sous-bassins versants : il s'agit du bassin versant du ruisseau des Violettes et celui du ruisseau du Moulinet, tous deux affluents de la rive gauche de l'Oir. Le bassin des Violettes couvre 225 ha et comprend une centaine de parcelles agricoles. La partie amont du bassin versant du Moulinet, retenue pour l'étude, couvre 453 ha, avec presque 200 parcelles (figure 2).

Cette zone d'étude est une zone atelier pour plusieurs équipes de recherche et d'enseignement, dont celles de l'INRA et de l'ENSAR, partenaires du projet qui suivent les populations de salmo-



◀ Figure 2 – Localisation des deux bassins versants de l'étude.

nidés de ces ruisseaux depuis 1984 (Baglinière, Marchand, 2002). Leur taille volontairement réduite permet la réalisation d'une analyse fine.

Ces bassins hydrographiques présentent une même origine géologique avec des sols sensibles à la battance. Le relief assez tourmenté autour des ruisseaux encaissés est un facteur favorable aux phénomènes de ruissellement et d'érosion.

Les paysages agraires sont essentiellement constitués de prairies le long des ruisseaux, facteurs favorables pour la résistance à l'érosion, contrairement aux cultures de maïs-fourrages ensilés dont les surfaces ont fortement augmenté au cours des dernières décennies en se substituant aux prairies.

Les pratiques culturales, conjuguées au facteur climatique de type océanique, façonnent un contexte pédologique extrêmement favorable aux transferts de particules, à certaines périodes de l'année (encadré 1). Cela tient à leur action sur la rugosité du sol, son système de porosité et l'état de tassement.

Dans les deux bassins étudiés, les talus et la prairie, éléments fondamentaux du paysage bocager, tiennent encore une large place (prairies permanentes et temporaires occupent environ 50 % de la SAU en 2001 sur les deux bassins). Les exploitations sont orientées vers un système de production

Encadré 1

Dimension temporelle de la prédisposition aux transferts de particules

La période de semis des maïs en avril/mai

En avril/mai, l'affinage du sol réalisé avant les semis accentue sa prédisposition à l'érosion. Cet affinage a pour but de permettre une bonne infiltration de l'eau dans le sol ainsi qu'une bonne levée des semis, tout en assurant un bon contact terre-graine. Toutefois, il diminue la rugosité du sol, facteur limitant du ruissellement.

Ainsi, durant tout le mois de mai, alors que les pieds de maïs sont encore loin de former un couvert végétal protecteur, la sensibilité du sol à l'érosion est élevée, et dépend fortement de la préparation du lit de semence réalisé au cours du mois d'avril. La formation d'une croûte de battance est fréquente durant cette période, au cours de laquelle il y a lieu d'arbitrer entre ameublissement du sol, augmentation de sa porosité par affinage, puis éventuellement binage et respect d'une certaine rugosité de surface. En voulant développer la capacité d'infiltration du sol, on risque d'accroître le risque de ruissellement et d'entraînement des particules désolidarisées.

bovin laitier. L'assolement, sur les deux bassins, repose essentiellement sur les cultures annuelles du maïs-fourrage (ensilé), des prairies temporaires (dont le *ray-grass*) et du blé tendre.

Parallèlement, la tendance à l'agrandissement des exploitations et des parcelles, l'impact du remembrement et le manque d'entretien des haies/talus concourent à cette lente destruction du bocage.

En relation avec les pratiques culturales, on peut retenir plusieurs facteurs d'aggravation de la sensibilité du sol aux phénomènes d'érosion hydrique :

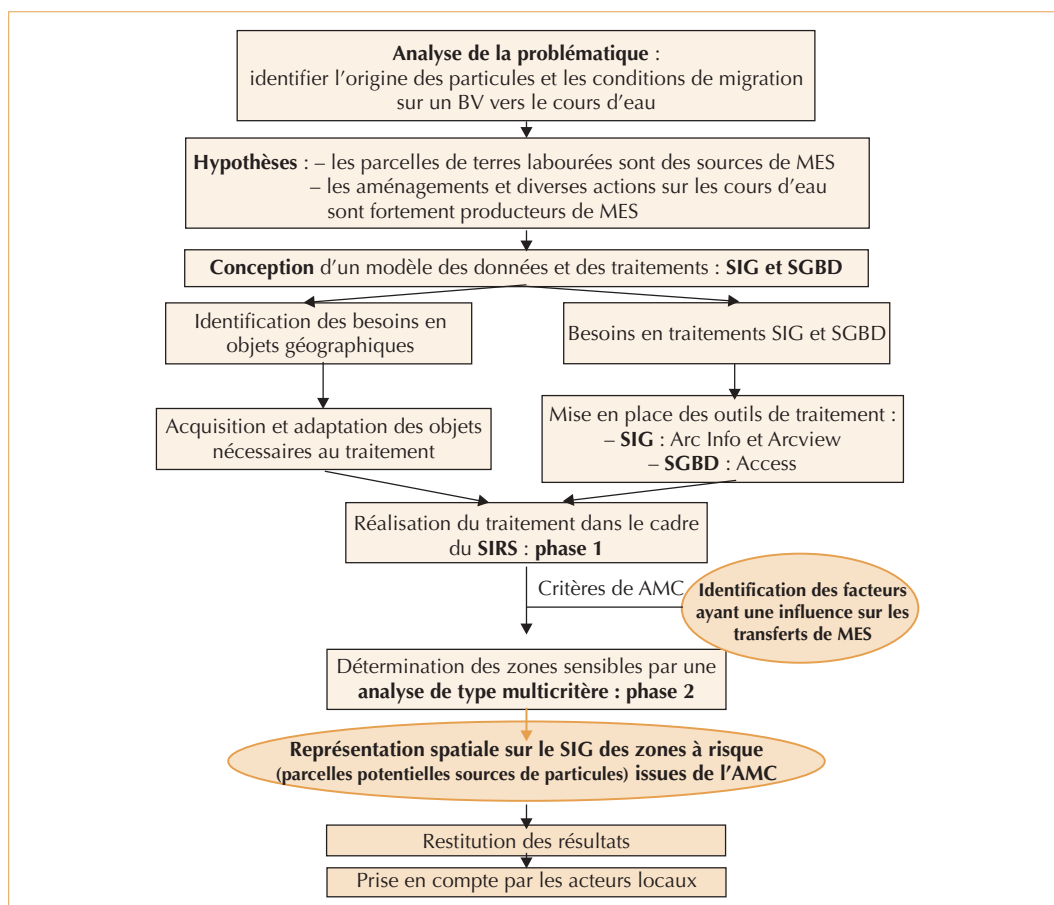
- la mise à nu du sol durant la phase hivernale pour les parcelles de maïs,
- la compaction du sol et la formation d'ornières par le passage répété d'engins agricoles,
- le travail du sol dans le sens de la pente,
- l'exportation de terre par les roues des engins.

Ces facteurs interagissent souvent, dans un système où la pluviosité peu violente mais régulière, joue un rôle central.

Mise en place d'une démarche d'identification des parcelles prédisposées aux transferts particuliers

Nous avons fait le choix d'identifier les zones source potentielles d'émission de particules, par une analyse de type multicritères (AMC). Nous expliciterons d'abord les principes et la méthode utilisée, puis son adaptation à notre problématique et le choix des critères que nous avons retenus. Cette méthode nécessite de retenir d'abord les facteurs explicatifs qui constituent les critères de discrimination des parcelles dans l'AMC (Maystre *et al.*, 1994 ; Simos, 1990). Ces facteurs ont été identifiés à la suite de l'étude bibliographique relative aux phénomènes d'érosion hydrique. La figure 3 présente la démarche

► Figure 3 – Démarche appliquée dans la conduite du projet.



que nous avons construite pour atteindre les objectifs pré-cités.

Une analyse de l'occupation du sol et des pratiques agricoles (Berville, 2002) a été réalisée par des enquêtes auprès de tous les acteurs de terrain (60 agriculteurs, conseillers agricoles, élus, DDAF, chambre d'agriculture). Ces données ont été traitées dans un SIG et une base de données Access®. La figure 4 illustre la structure du SIG et son apport à la construction des critères de discrimination des parcelles à risque (Macary, 2003).

Les différentes couvertures ont été développées sous ArcInfo®, dont la numérisation du plan cadastral et des réseaux, l'application d'un modèle numérique de terrain au pas de 50 m interpolé à 10 m. Ainsi, cette étape de constitution du SIG a permis de traiter spatialement les informations concernant la topographie, l'occupation du sol au niveau de chaque parcelle culturale, les pratiques qui y sont menées, l'emplacement de différents éléments du micro-relief (talus) et d'aménagements (recalibrage de portions de ruisseau), les zones d'abreuvoirs naturels et de piétinement créées par les animaux sur les ruisseaux.

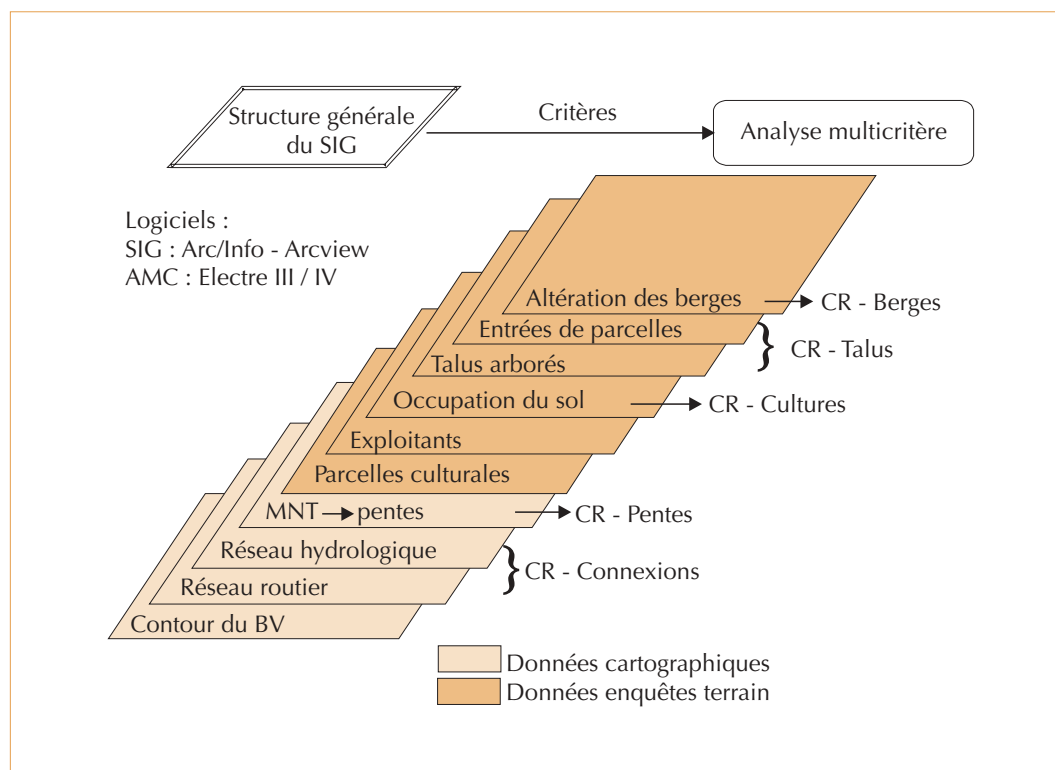
L'analyse multicritère : principes et méthode utilisée

L'analyse multicritère constitue une catégorie de méthodes d'analyses d'aide à la décision, dans notre cas à référence spatiale. Elle permet de modéliser les préférences du décideur, afin de l'impliquer dans le processus décisionnel et d'effectuer des choix entre différentes variantes de solution d'un problème décisionnel donné. Cette méthode avait été testée par Laaribi en Tunisie pour discriminer des sous-bassins versants dans le cadre d'un programme de conservation des eaux et du sol (Laaribi, 2000).

Dans notre étude, une parcelle agricole représente une *action*, c'est-à-dire l'élément de solution qui contribue à la décision, dans la terminologie générale de la méthode.

Un *critère* est un facteur de jugement, relié aux préférences du décideur sur la base duquel on mesure et on évalue une action. Les critères traduisent en fait les facteurs qui concourent aux transferts particuliers.

Nous avons choisi d'utiliser ce type de méthode pour notre projet, car elle permet de hiérarchiser



◀ Figure 4 – Structure générale du SIG. Extraction des critères utilisés dans l'analyse multicritère.

Encadré 2

Les méthodes ELECTRE

Les méthodes ELECTRE (élimination et choix traduisant la réalité) ont été développées par le professeur Roy et son équipe du laboratoire d'analyse et de modélisation de systèmes pour l'aide à la décision de l'université de Paris-Dauphine. Elles entrent dans la catégorie des méthodes *discrètes* et de *surclassement*.

Les *méthodes discrètes* concernent les problèmes décisionnels représentés par un nombre fini d'actions potentielles. Leur principal but consiste à fournir une base pour la comparaison de ces actions potentielles suivant plusieurs critères.

Les *méthodes de surclassement* ont été conçues afin de progresser dans la résolution d'un problème de décision, en substitution aux relations de dominance que peu d'actions vérifient dans un problème multicritère, c'est-à-dire des performances d'une action $a \geq$ à celles d'une action b pour l'ensemble des critères.

Dans une relation de *surclassement*, les procédures consistent à agréger les critères dans une relation binaire partielle. Les modèles de surclassement ne s'appuient pas sur une axiomatique mathématique solide, mais ils exploitent plutôt l'information disponible, avec ses imprécisions et son insuffisance, ce qui présente d'autant plus d'intérêt dans l'approche agro-environnementale de notre problématique.

Ainsi le principe de ces méthodes est le suivant :

- d'abord on effectue les comparaisons des actions deux à deux, en respectant les principes d'incomparabilité et d'intransitivité pour savoir quelle action surclasse l'autre ;
- en seconde phase, on exploite ces relations de surclassement en se basant sur la théorie des graphes. En fait cette procédure est partielle car on appréhende les préférences du décideur sans chercher une agrégation complète. Cela permet toutefois d'obtenir une meilleure modélisation de la réalité.

La relation de surclassement intègre la *relation floue*, car il existe des couples d'actions où elle apparaît indiscutable, et des couples où elle paraît peu convaincante. Cette plausibilité suivant les couples est exprimée par un indice : *le degré de crédibilité* du surclassement. Il n'est plus utile de classer les actions dans l'une des trois catégories de surclassement : faible, fort, néant ; toutes les positions intermédiaires entre les extrêmes sont possibles. La réflexion ne porte donc plus sur l'acceptation ou le rejet en bloc de l'hypothèse de surclassement, mais sur la crédibilité à accorder à cette hypothèse. Ceci est traduit par le degré de crédibilité de l'hypothèse de surclassement qui varie de 0 à 1.

La procédure de classement correspond à une distillation descendante et à une autre ascendante. La distillation descendante sélectionne au fur et à mesure les meilleures actions pour terminer avec les plus mauvaises, ce qui est inversé pour la distillation ascendante.

Le résultat final est un préordre partiel issu de l'intersection des deux résultats précédents : il tolère les *ex aequo* et l'incomparabilité entre actions lorsqu'elle existe (d'où la notion de préordre partiel) et il révèle la partie la plus fiable de la préférence globale.

La méthode permet d'utiliser simultanément des *vrais-critères* (quantitatifs) et des *pseudos-critères* (qualitatifs) qui peuvent être pondérés (ELECTRE III) ou non (ELECTRE IV).

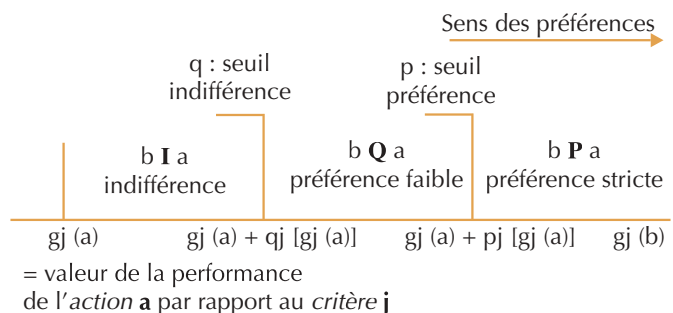
Pour chaque critère, sont introduits des *seuils d'indifférence* q et de *préférence stricte* p . Ils ont été définis de manière à tenir compte directement de l'incertitude qui entache plus ou moins les valeurs de la matrice des évaluations, suivant le fait que ses éléments sont soit mal définis, soit connus avec une marge d'imprécision.

- Le *seuil d'indifférence* représente la différence de performance à partir de laquelle deux actions ne sont plus indifférentes.
- Le *seuil de préférence stricte* exprime la différence de performance à partir de laquelle une action est nettement préférée à l'autre.

Les seuils sont considérés comme des fonctions affines des performances $g_j(a)$ et sont calculés ainsi : $\text{seuil}(g_j(a)) = \alpha \times g_j(a) + \beta$ (l'utilisateur doit préciser la valeur des deux coefficients α et β par critère et pour chaque seuil).

Ils peuvent être calculés en fonction de la pire ou de la meilleure des performances de a et de b . Dans le premier cas, le mode de calcul des seuils est dit *direct*, et dans l'autre cas *inverse*.

On peut illustrer ce principe du surclassement par le schéma ci-contre. I, Q, P, *représentent les relations de préférences*. Toutefois, la variation des différentes valeurs de ces seuils que nous avons testées dans ce projet, n'a pas entraîné de modifications majeures des résultats, comparativement à toute modification apportée aux critères.



toutes les parcelles de nos deux bassins versants suivant leur prédisposition à l'émission et au transfert de particules, en fonction de critères de nature quantitative et qualitative, et suivant les seuils de préférence introduits par l'utilisateur. Pour comparer un ensemble d'actions (parcelles), on mesure d'abord leurs performances eu égard aux différents critères : c'est l'étape de l'évaluation multicritère. Différentes problématiques décisionnelles peuvent être utilisées : procédure de sélection ou choix, de segmentation ou *tri*, de rangement ou *classement*, de description ou *cognitive*. Celle que nous avons retenue pour notre projet est celle du classement, développée par le laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision (LAMSAD) de l'université Paris-Dauphine sous le nom de méthodes ELECTRE (encadré 2).

Les méthodes ELECTRE permettent de distribuer un ensemble fini d'actions, suivant des critères cohérents, en classes d'équivalences. Elles procèdent en deux étapes :

- construction des relations de surclassement, par comparaison de couples d'actions,
- rangement des actions en classes à partir des surclassements précédents.

ELECTRE III introduit une pondération des critères, alors que ELECTRE IV est utilisée lorsqu'on ne peut évaluer le poids relatif des critères.

Nous avons choisi d'utiliser la méthode ELECTRE III déjà testée au sein de notre unité de recherche pour d'autres types de problématiques agro-environnementales. Dans les grandes lignes, cette méthode fonctionne en trois phases : construction de la relation de surclassement, élaboration de deux classements antagonistes, synthèse d'un classement final.

Utilisation de la méthode ELECTRE

Notre problématique était de classer les parcelles sources de transfert de particules, suivant une hiérarchie croissante. Dans ce cas, les actions les plus performantes doivent s'appliquer aux parcelles qui présentent le potentiel le plus fort. Nous avons alors choisi de discriminer ces parcelles suivant cinq *critères* exprimant des contraintes physiques et anthropiques déterminantes dans les processus de transferts particuliers. Chaque parcelle reçoit une valeur dite de *performance* pour chacun des critères qui est saisie dans la matrice des performances de toutes les parcelles.

Les deux sous-bassins versants des Violettes et du Moulinet comptent respectivement 98 et 183 parcelles culturelles à classer.

La qualité de l'analyse multicritère dépend surtout du choix des critères et de leurs paramètres d'évaluation. La méthode ELECTRE III permet d'utiliser des vrais critères (pente) et des critères qualitatifs (ou *pseudo-critères* pour les autres), et ainsi de prendre en compte l'ensemble des facteurs discriminants significatifs pour lesquels il nous est possible d'attribuer une valeur de performance aux parcelles.

Nous avons retenu cinq critères compte tenu de leur importance reconnue vis-à-vis des phénomènes étudiés, et bien sûr suivant la possibilité de les renseigner pour toutes les parcelles :

- la pente des parcelles (CR1),
- la connectivité (CR2) entre les parcelles et le cours d'eau,
- la micro-topographie (CR3) : talus en aval des parcelles,
- l'occupation du sol (CR4),
- le degré d'altération des berges (CR5).

En revanche, nous n'avons pas pu utiliser la nature des sols comme facteur discriminant des parcelles, car il n'était pas envisageable matériellement d'effectuer une analyse de texture de sol à chaque parcelle. Par ailleurs, une vingtaine d'analyses de sol disponibles traduisent une assez bonne homogénéité au niveau des deux sous-bassins versants.

Le principe même de l'analyse multicritère implique que chaque critère apporte une information non redondante par rapport aux autres, ce qui exclue évidemment toute combinaison traduisant un premier degré d'analyse, et qui aurait alors pour conséquences de perturber le classement des parcelles. En revanche, la pondération permet d'exprimer la priorité accordée à chacun pour le rôle qu'ils jouent dans les transferts particuliers. Nous avons effectué une dizaine de tests de pondération, et l'expertise de terrain, par rapport à notre connaissance de la zone d'étude, nous a conduit à choisir la meilleure combinaison : critères – pondération des critères – valeurs des performances des actions par critère, suivant la cohérence des résultats obtenus par rapport au

classement obtenu de quelques parcelles cibles bien représentatives des différents types sur les bassins versants.

Choix des critères (CR) et de leur pondération

PENTE – CR1

Le critère pente est le seul « vrai critère » de l'AMC, par opposition aux pseudos-critères : les performances pour chaque action sont des valeurs numériques brutes. Les valeurs de performance transcrivent un double effet pente + surface. À partir du modèle numérique de terrain (MNT) extrapolé à 10 m sous le SIG, sont déterminés pour chaque parcelle les sommes ($P \times Si$) où P_i est la pente du polygone et Si la surface correspondante.

Les $\sum (P_i \times Si)$ les plus forts sont associés au risque le plus fort pour ce critère.

CONNECTIVITÉ – CR2

Ce critère représente l'ensemble des connexions entre une parcelle et le cours d'eau. Il permet de caractériser la facilité de migration des particules, compte tenu de la distance au cours d'eau et de la nature de la connexion. Les observations terrain et la numérisation du réseau de routes et chemins sont la base de cette estimation. On évalue d'une part le type de connexion, d'autre part la distance au ruisseau. Cinq paramètres de notation de la performance ont été définis :

- **10** : parcelle traversée par le ruisseau,
- **8** : connexion forte par la voirie, proximité du ruisseau (photo 1),

► Photo 1 – La voirie constitue une connexion forte entre les parcelles et le cours d'eau pour le transfert des particules (photo F. Macary).



- **5** : connexion moyenne, à une distance plus grande,
- **2** : connexion faible ou lointaine,
- **0** : pas de connexion.

C'est le critère à la pondération la plus faible. Avant d'intervenir efficacement dans les transferts particuliers, il est dépendant de plusieurs autres critères qui interviennent en amont. Seul, il est donc faiblement discriminant. Il convient, toutefois, de ne pas négliger son rôle dans l'apport de particules au ruisseau. Les observations sur le terrain et les témoignages l'ont démontré à plusieurs reprises.

TALUS – CR3

Les talus sont des éléments clé du paysage et de la topographie du secteur d'étude. Initialement support de haies, les talus maillent le paysage normand en mettant en évidence les contours de parcelles. Néanmoins, les mutations de l'espace rural depuis les années 1970 ont conduit à une lente déstructuration de ce maillage bocager et à un abandon de l'entretien de haies. Aujourd'hui, ce maillage est beaucoup plus lâche, et quand les talus subsistent, ils ne sont plus automatiquement le support de haies. À l'inverse, les alignements d'arbres en bordure de parcelles sont quasi systématiquement les témoins d'anciens complexes haies/talus. Quand ils existent encore, les talus mesurent entre 20 et 150 cm. Ils ont fait l'objet d'un recensement sur les deux bassins lors de la campagne d'avril 2003, afin d'alimenter la couverture « talus » du SIG.

Pour la notation du critère dans la matrice de performance, c'est la présence d'un talus en position aval d'une parcelle, et donc en travers de la pente qui est considérée. On évalue la capacité de la parcelle à émettre des particules mobilisables par le ruissellement : la protection éventuelle par un talus intervient donc en aval. Les paramètres de notation de la performance sont les suivants :

- **10** : pas de talus, aucune protection face au ruissellement,
- **6** : talus partiel,
- **2** : talus avec passage, entrée de parcelle en aval,
- **0** : talus fermé, isolement hydraulique.

La présence ou l'absence d'un talus est très discriminante dans l'AMC. La pondération du critère est forte. Le talus est un critère qui peut annihiler,

à lui seul, le risque effectif de transfert de particules. A l'inverse, l'absence de talus représente un handicap certain, en termes d'érosion, pour une parcelle.

CULTURES – CR4

Le thème occupation du sol du SIG a été renseigné à partir des enquêtes chez les agriculteurs. En termes d'érosion, la présence d'une couverture végétale permanente représente une protection efficace du sol. En revanche, les terres labourables facilitent le développement des processus érosifs, surtout durant certaines périodes critiques, quand le sol est à nu : travail de la terre en mars-avril, récolte du maïs en octobre...

C'est donc avant tout la distinction prairie/terres labourables qui nous intéresse ici. De ce fait, les paramètres de notation du critère sont établis sur cette différenciation, en considérant que les parcelles de vergers constituent la situation intermédiaire :

- **10** : terres labourables, contexte d'érosivité maximale,
- **5** : vergers et autres cultures pérennes, sauf prairie,
- **1** : prairie temporaire ou permanente, protection du sol.

BERGES – CR5

Il est évident que le premier facteur potentiel d'augmentation de la turbidité du cours d'eau est l'évolution (naturelle ou anthropique) des berges ou leur altération par le piétinement des animaux. Les processus d'érosion « naturelle » interviennent, mais c'est surtout le piétinement des berges et du lit par des animaux traversant, s'abreuvant, ou se nourrissant en bordure de ruisseau qui provoque cet excès de MES dans l'eau (photo 2) : cela explique ici notre qualificatif d'« altération des berges »⁴.

Un descriptif indispensable de tout le cours des ruisseaux a été réalisé pour répondre aux para-



▲ Photo 2 – Le piétinement des berges et du lit des cours d'eau par les animaux est une source majeure d'émission de particules (photo J. Paulais).

mètres de notation suivants, pour les parcelles concernées par une portion de cours d'eau :

- **10** : altération importante des berges et/ou du lit : abreuvoirs sauvages, linéaire de berges piétinées...
- **6** : altération moyenne : présence d'un abreuvoir, fragilisation des berges sur quelques mètres,
- **2** : altération faible : effondrements ponctuels naturels ou provoqués, passages busés sensibles,
- **0** : pas d'altération anormale notable, berges enherbées et clôturées.

Nous avons fait le choix de ne pas tenir compte des recalibrages récents des cours d'eau en amont, car il s'agit d'une action conjoncturelle dont les effets seront estompés après la couverture végétale naturelle des berges dans quelques mois. La pondération nécessaire dans ce cas aurait quasiment occulté le rôle des autres facteurs explicatifs.

La synthèse des critères et de leur pondération est représentée dans le tableau 1.

4. La distinction entre les termes « évolution » et « altération » des berges permet de distinguer deux situations :
 – la première est liée à la dynamique propre du cours d'eau et qualifie une évolution quasi naturelle ;
 – la seconde correspond aux actions plus agressives des animaux qui provoquent l'altération des berges par piétinement et parfois effondrement.

	Pondération				
	Pentes	Connectivité	Talus	Cultures	Berges
Violettes	2	1	3	2	4
Moulinet	1	1	3	2	4

◀ Tableau 1 – Synthèse des critères et de leur pondération.

Résultats et perspectives

Identification des zones prédisposées à l'émission et aux transferts particulaires

Dans cet article, par souci de concision, seuls les résultats du bassin versant du Moulinet seront présentés. À l'issue du traitement ELECTRE, les parcelles sont classées par rang du pré-ordre final. Le traitement que nous avons retenu, suivant le choix des paramètres pré-cités, nous conduit ainsi à un classement des 183 parcelles en 53 rangs. Afin de mieux les visualiser, nous avons exporté ce résultat sous Arcview®.

La représentation de l'ensemble des parcelles sous forme cartographique, nous oblige à agréger les 53 rangs, ce qui conduit à une perte d'information.

Aussi, nous avons choisi de ne présenter ici (figure 5) que les résultats du classement des parcelles situées dans les 10 premiers rangs non agrégés, soit environ 20 % d'entre elles ; elles correspondent aux plus forts potentiels d'émission de particules dans le bassin du Moulinet.

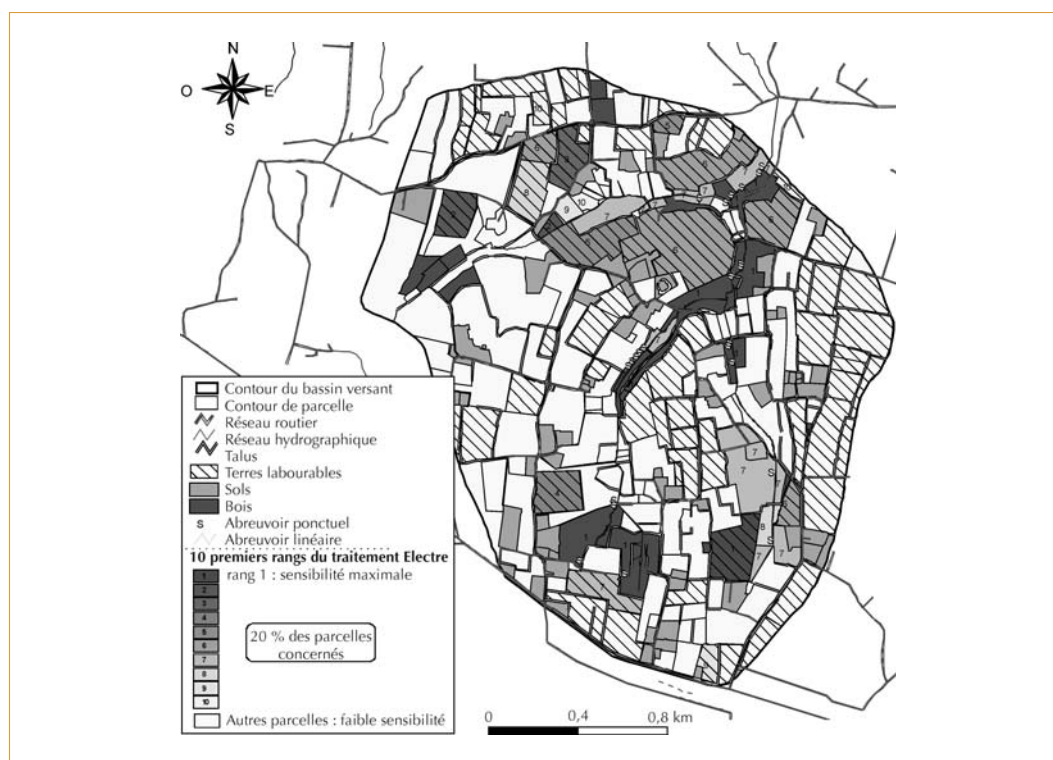
La plupart des parcelles à forte contribution érosive sont en contact direct (présence de berges

altérées par des zones d'abreuvement) ou indirect avec le ruisseau (connexion forte par une route, un chemin). De fortes pentes, en l'absence de talus, interviennent de façon importante sur le classement. On relève également que l'enherbement des parcelles proches du ruisseau ne joue pas un rôle tampon suffisant, en présence de connexions directes entre celles-ci et le ruisseau.

Nous avons réalisé une typologie des parcelles les plus érosives. Elle permet de différencier principalement des parcelles :

- de prairie, traversées par le ruisseau ou en bordure de celui-ci, avec la présence de zones abreuvoirs non aménagés fragilisant les berges (repère 1 sur la figure 5),
- cultivées, proche du ruisseau, sans talus en aval et aux pentes fortes (2),
- cultivées (maïs) au ras du ruisseau (3),
- cultivées à proximité du ruisseau et connectées à celui-ci par une route ou un chemin (4),
- cultivées, éloignées du ruisseau, sans talus aval, mais connectées par une route ou un chemin (5).

► Figure 5 – Carte de sensibilité des parcelles aux transferts de particules érodées dans le bassin du Moulinet (la carte ci-contre utilise en réalité des niveaux de couleur et des symboles graphiques variés pour représenter différentes classes de sensibilité).



Perspectives : proposition de mesures

Nous n'aborderons pas les prescriptions liées à l'occupation du sol inhérent à l'assolement, et au travail du sol proprement dit, car elles reposent sur les choix cultureux des agriculteurs liés à leur système d'exploitation. En revanche, il est envisageable de proposer un type de mesures visant à réduire le transfert des matières particulaires vers le ruisseau (Paulais, 2003) (figure 6).

Cette étude montre à quel point l'analyse des processus érosifs est complexe, particulièrement lorsqu'ils concernent des parcellaires comprenant une occupation du sol variée.

Les résultats de l'AMC ont confirmé le rôle déterminant pour les phénomènes étudiés de l'altération des berges, principalement due à l'abreuvement des animaux et celui des talus en aval des parcelles qui bloquent la migration des particules érodées.

Les mesures préventives et curatives qui peuvent être mises en œuvre peuvent être très simples dans leur principe. Un premier type de mesures

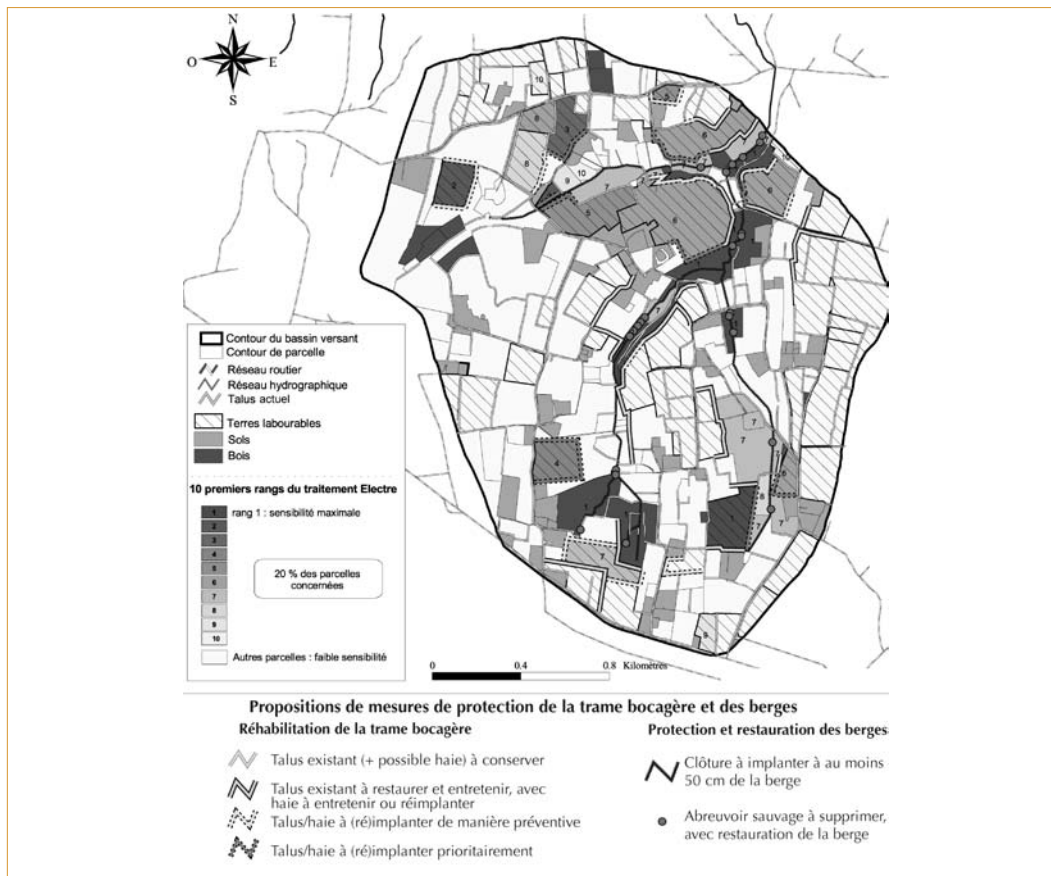
concerne la protection et la restauration des berges :

- suppression des abreuvoirs sauvages et restauration des berges altérées,
- implantation de clôtures le long des berges à une distance d'au moins 0,50 m,
- installation d'abreuvoirs type pompe à nez avec une alimentation gravitaire depuis le ruisseau.

Un second type de mesures vise à restaurer, conserver ou réhabiliter la trame bocagère :

- restaurer et entretenir certains talus existants, avec réimplantation de haies dans certains cas,
- réimplanter des talus et une haie afin de les stabiliser, au niveau de certaines zones particulièrement sensibles, là où ils ont disparu lors du remembrement réalisé en 1982, ou depuis, sous l'effet des agrandissements des exploitations.

Il est envisageable que de telles mesures puissent être mises en pratique suivant une démarche collective, par exemple dans le cadre d'un syndicat d'aménagement et de gestion des eaux au niveau de l'Oir.



◀ Figure 6 – Carte des mesures proposées en vue de la protection de la structure bocagère et des berges (la carte ci-contre utilise en réalité des niveaux de couleur et des symboles graphiques variés pour représenter différentes classes de sensibilité).

Conclusion

Au cours des deux dernières décennies, les mutations des pratiques agricoles ont profondément modifié les paysages et la structure du bocage dans la région étudiée. L'intensification de la production laitière a entraîné une forte régression des prairies au profit du maïs-fourrage, ce qui génère des répercussions importantes sur la réaction des sols face aux phénomènes d'érosion hydrique. De plus, la texture des sols de type limoneux fin favorise la formation d'une croûte de battance, et donc accentue le ruissellement. Ces éléments constituent ainsi des facteurs favorables à l'émission et au transfert de particules vers les cours d'eau, et donc au colmatage des zones de frayères qui s'y trouvent.

La méthode d'identification de zones sources de particules et de transferts que nous avons développée et appliquée sur deux sous-bassins versants de l'Oir utilise la méthode ELECTRE III d'analyse multicritère, couplée à un SIG pour visualiser les résultats sous forme cartographique. Nous avons pu alors bâtir une typologie des parcelles les plus sensibles à ces processus.

Ainsi, l'AMC apparaît comme un outil efficace d'aide au diagnostic environnemental. Elle est d'autant plus performante que ses utilisateurs possèdent une bonne connaissance du terrain étudié. Cette connaissance du terrain et des pratiques agricoles est indispensable à une bonne pondération des critères, à la validation des premiers résultats par expertise de parcelles caractéristiques. Cette méthode reproductible est donc particulièrement adaptée à de petits bassins versants. Parallèlement, le maillage parcellaire cultural apparaît comme l'échelle de travail optimale, au sein d'un bassin versant, tant pour appréhender la prédisposition à l'érosion que pour fournir une cartographie indicative de mesures à mettre en œuvre.

Cette méthode est très complète. Elle présente l'intérêt d'exploiter l'information en préservant un maximum de nuances et d'avancer des conclusions bien fondées. En revanche, son utilisation est délicate, et la compréhension de sa mise en œuvre par les acteurs de terrain mérite une attention particulière. □

Remerciements

Les auteurs remercient Daniel Uny pour son appui à la mise en œuvre du SIG, ainsi que Ramon Laplana pour ses conseils avisés lors de la relecture du texte.

Résumé

Au sein d'une action structurante de recherche intitulée AQUAE, un projet de recherche étudie les effets de la gestion des bassins versants sur les transferts particuliers et dissous, et sur la qualité biologique des eaux de surface en zone d'élevage. Nous avons cherché les explications à l'émission et aux transferts de matières en suspension vers deux petits cours d'eau, affluents de l'Oir. Celles-ci proviendraient de l'altération des berges et de l'érosion des sols agricoles, où les terres ensemencées en maïs-fourrage remplacent les prairies, parallèlement à la déstructuration des éléments du bocage.

Après avoir traité les différentes informations issues du terrain et de la cartographie dans un SIG, nous avons utilisé une méthode d'analyse multicritère d'aide à la décision (ELECTRE III) pour discriminer les zones sensibles à l'émission des particules érodées.

Abstract

In the Aquae research program, a project examines the effects of watershed management systems on particles and dissolved element transfers, and on water quality in a breeding area. We looked for the explanations about the particle growth emissions and transfers toward two small streams which are tributaries of the Oir. Little by little, ploughland is spreading at the expense of grassland, the "Bocage" landscape structure is disappearing : consequently, soil erosion phenomena are becoming harsher and riverbank fragility is increasing.

We have first processed the different informations from ground and cartography with a GIS. Afterwards, we have analysed the sensitivity of zones to particle transfers by carrying out a multi-criteria evaluation with the ELECTRE method.

Annexe

Quelques concepts essentiels en matière d'érosion hydrique et de ruissellement

L'érosion des sols par l'eau est un phénomène complexe qui résulte de divers processus (détachement, transport et dépôt) causés par l'action en général combinée de la pluie et du ruissellement, et dont l'expression varie en fonction de la résistance du milieu (sol, couvert végétal, techniques culturales) et de la topographie. L'action des pluies sur la surface du sol détruit les agrégats, et si la texture et la composition physico-chimique du sol s'y prêtent, la structure initiale du sol peut être totalement détruite. La surface du sol passe d'un état meuble et poreux à un état plus compact. La couche superficielle s'individualise par rapport au reste du profil et forme une croûte de battance qui diminue considérablement la perméabilité du sol, et accroît le ruissellement et l'érosion. Ainsi, dans certains cas, de larges zones de terre peuvent-elles rester sèches alors qu'un ruissellement se produit au-dessus d'elles sur les croûtes de battance (Boiffin *et al.*, 1988). Cette érosivité dépend essentiellement de l'intensité et du volume des précipitations (Gril et Duvoux, 1991).

Le ruissellement a un rôle déterminant dans le détachement des particules, en particulier dans les formes d'incision et dans le transport du matériel mobilisé. En l'absence de ruissellement, les particules de sol détachées par la pluie ne sont pas transportées très loin. L'érosion est ainsi très dépendante des mécanismes de formation du ruissellement.

Les paramètres topographiques sont fondamentaux pour expliquer l'importance des phénomènes érosifs (Wishmeier, Smith, 1978). Par exemple, si la pente des surfaces était nulle, l'écoulement des eaux de pluie serait très faible et les produits détachés par la battance resteraient sur place.

Les talus ont d'abord un effet sur la topographie. Ils freinent l'écoulement de l'eau, diminuant ainsi sa capacité de transport et provoquent la sédimentation d'une partie des matières solides, limitant l'érosion. En réduisant la vitesse, ils allongent le temps de circulation, permettant ainsi à une partie de l'eau de s'infiltrer. En outre, la végétation buissonnante permet de stabiliser le talus qui peut constituer un des éléments du réseau hydraulique.

Par ailleurs, il a été montré par divers auteurs qu'un couvert végétal bien développé protège le sol de l'action des pluies. La couverture qui protège le mieux le sol est la prairie (Tellier, 2000). En effet, celle-ci protège le sol de l'action des gouttes de pluie et les racines maintiennent en place les particules emprisonnées dans un réseau racinaire dense qui accroît ainsi la résistance du sol au cisaillement et limite l'incision. Par ailleurs, du fait de la consommation d'eau, la végétation peut drainer et assécher le sol.

Or, l'effet protecteur du couvert végétal n'est efficace que si la surface du sol n'est pas dégradée avant que la végétation se soit suffisamment développée pour exercer cette protection (Boiffin *et al.*, 1988).

Les sols cultivés restent peu ou pas couverts pendant certaines périodes de l'année, qui peuvent être critiques si les pluies sont abondantes ou intenses et les états de surface favorables à la formation et à la concentration du ruissellement. L'évolution des états de surface est conditionnée à la fois par les conditions climatiques et par les techniques mises en œuvre dans le cadre de parcelles cultivées. La possibilité de réduire les risques de ruissellement et d'érosion, au niveau des parcelles agricoles, ne peut donc être appréciée qu'en tenant compte de l'ensemble des éléments : les mécanismes de formation du ruissellement et de l'érosion, mais aussi les itinéraires techniques mis en œuvre.

L'analyse des rythmes culturaux en fonction des saisons permet de dégager des périodes sensibles car le système cultural suit un cheminement impératif en raison de la faible diversité des assolements (encadré 1, page 5). Depuis une vingtaine d'années, de nombreux auteurs ont constaté une augmentation des dégâts. Cette évolution ne peut-être imputée au changement climatique, mais plutôt à une fragilité accrue des agrosystèmes, qui résulte d'une évolution des structures agraires et des techniques agricoles, elle-même liée en général à une intensification de la production (Bonnamour, 1992 ; Papy, 1992). Un des facteurs premiers mis en cause est l'évolution de l'occupation du sol à travers la diminution des prairies permanentes et l'introduction de cultures modifiant le rapport entre les cultures d'hiver et les cultures de printemps. La régression des prairies a entraîné la mise en culture de zones fragiles comme des versants pentus ou des talwegs peu marqués. Ouvry (1990) montre que dans le Pays de Caux, l'introduction de certaines cultures comme le maïs-fourrage a augmenté le pourcentage d'intercultures longues, augmentant donc les risques de ruissellement étant donné l'état de dégradation des sols et l'absence de résidus végétaux.

De plus, les conséquences de cette évolution ont été accentuées par une augmentation de la taille des parcelles et par la modification des façons culturales (Ouvry, 1990). Grâce au remembrement, les parcelles ont été adaptées aux exigences de la mécanisation, mais cela accroît la superficie des surfaces susceptibles de générer du ruissellement. Cela s'accroît lorsqu'un agriculteur décide pour des raisons de commodité d'affecter la même culture à des surfaces voisines. Au niveau des techniques culturales, et pour permettre d'augmenter les rendements, les lits de semence ont été affinés (Boardman, 1998, cité par Souchère, 1995) ce qui favorise l'apparition de la battance et réduit les possibilités de rétention superficielle des eaux (Ouvry, 1990).

Bibliographie

- AUZET, V., LILIN, C., PAULET, B., 1987, *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques*, 60 p.
- BAGLINIERE, J.-L., MARCHAND, F., 2002, *Évolution des populations de saumon Atlantique (Salmo salar) de l'Oir, petit cours d'eau de Basse-Normandie de 1984 à 2002*, rapport du Comité de Gestion Cerisel/UMR INRA-ENSA, EQHC, Rennes, 10 p.
- BERVILLE, D., 2002, *Compréhension des phénomènes de transferts particuliers en zone d'élevage, dans un sous-bassin versant de l'Oir, en Basse-Normandie, par la modélisation spatiale des paysages et des pratiques agricoles*, mémoire de DEA, Géographie, université Montaigne Bordeaux 3, Bordeaux, 119 p.
- 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*, vol. 8, n° 8, p. 663-673.
- BONNAMOUR, J., 1992, Structures agraires et érosion des sols, *Bulletin de l'association de géographes français*, vol. 1992-2, p. 83-90.
- BOARDMAN, J., 1998, Severe erosion on agricultural land in East Sussex, UK, *Soil technology*, vol. 1, p. 333-348.
- CROS-CAYOT, S., 1996, *Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte Armoricaïn*, thèse de doctorat, Sciences de l'environnement, Rennes, 223 p.
- DELAHAYE, D., 1992, *Approches spatialisées et analyses expérimentales des phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols : application aux systèmes de production agricoles du Calvados*, thèse de doctorat, Géographie, Caen, 427 p.
- GRIL, J.-J., DUVOUX, B., 1991, *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion, condition d'adaptation des méthodes américaines*, Cemagref Éditions, Antony, 157 p.
- LAARIBI, A., 2000, *SIG et analyse multicritère*, Hermès Sciences Publications, Paris, 190 p.
- LUDWIG, B., 2000, Les déterminants agricoles du ruissellement et de l'érosion : de la parcelle au bassin versant, *Ingénieries - EAT*, n° 22, p. 37-47.
- MACARY, F., 2003, Intérêt d'un SIG pour l'action scientifique Aquae sur l'eau et l'agriculture : effets de la gestion des bassins versants sur l'érosion et la qualité biologique des eaux de surface en zones d'élevage, in *Apports des SIG au monde de la recherche*, université d'Orléans, 21 p.
- MARTIN, P., PAPY, F., SOUCHÈRE, V., CAPILLON, A., 2000, Ruissellement agricole : cerner les marges de manœuvre par une modélisation des pratiques de production, *Ingénieries - EAT*, n° 23, p. 25-37.
- MAYSTRE, L.-Y., PICTET, J., SIMOS, J., 1994, *Méthodes multicritères ELECTRE : « description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale »*, Lavoisier, TEC & DOC, Paris, 323 p.
- MULLER, C., 1995, *Les zones tampons. Éléments de la gestion équilibrée des hydrosystèmes*, Cemagref, groupement Lyon, Lyon, 85 p.
- OUVRY, J.-F., 1990, Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré : Expérience du Pays de Caux (France), *Cahiers ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. XXV, n° 1-2, p. 157-169.
- PAPY, F., 1992, Effets des structures agraires sur le ruissellement et l'érosion hydrique, *Bulletin de l'association de géographes français*, vol. 1992-2, p. 115-125.
- PAPY, F., POUJADE, C., SOUCHÈRE, V., 1992, Maîtrise du ruissellement et de l'érosion sur un territoire agricole : le double découpage de l'espace, in *Gestion de l'espace rural en Géographie et systèmes d'information géographiques*, eds Buche, D. ; King, D., et al., INRA, Paris, p. 167-176.

PAULAIS, J., 2003, *Identification des parcelles sensibles aux transferts de particules érodées grâce à l'analyse multicritère, en zone d'élevage bovin intensif, dans le bocage sud-Manche*, mémoire de DESS, Géographie, université Diderot Paris 7, Paris, 113 p.

SIMOS, J., 1990, *Évaluer l'impact sur l'environnement : « Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation »*, Presses polytechniques et universitaires Romandes, 261 p.

SOUCHÈRE, V., 1995, *Modélisation spatiale du ruissellement à des fins d'aménagement contre l'érosion de Talweg. Application à des petits bassins-versants en Pays de Caux (Haute Normandie)*, thèse de Docteur de l'INAPG, 200 p. + annexes.

TELLIER, F., 2000, *Occupation des sols et paysages des bassins-versants de la baie du Mont Saint-Michel. Nouvelles approches pour l'évaluation des risques érosifs*, Centre de Biogéographie-Écologie, CNRS-ENS, Saint-Cloud, 76 p.

WISHMEIER, W.-H., SMITH D.-D., 1978, *Predicting rainfall erosion losses, Agriculture handbook n° 537*, U.S. Department of Agriculture.