

Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale

Exemple du département de l'Aisne

Y. Le Bissonnais⁽¹⁾, N. Dubreuil⁽¹⁾, J. Daroussin⁽¹⁾ et M. Gorce⁽³⁾

(1) INRA CR d'Orléans, UR Science du Sol, avenue de la Pomme de Pin, BP 20619, 45160 Olivet, France.

(2) INRA, CR d'Orléans, Unité INFOSOL, avenue de la Pomme de Pin, BP 20619, 45166 Olivet

(3) Chambre d'Agriculture de l'Aisne, 02000 Laon, France.

RÉSUMÉ

L'érosion des sols représente un risque important pour les espaces agricoles et les zones situées à l'aval : pertes en terre, coulées de boue, turbidité et pollution des eaux. Au delà de l'érosion bien connue qui existe en montagne et dans les vignobles de coteaux, différents types de phénomènes érosifs ont été mis en évidence plus récemment dans les régions de grande culture : érosion diffuse et érosion de thalweg par concentration du ruissellement produit par de vastes parcelles agricoles imperméabilisées par la battance et le tassement des sols, érosion en rigoles sur des coteaux en culture de printemps. Ces phénomènes d'érosion des sols résultent de l'interaction entre de nombreux paramètres, dont certains sont permanents comme ceux relatifs au sol ou à la topographie, alors que d'autres évoluent dans le temps, comme l'occupation du sol, ou présentent un caractère aléatoire comme les précipitations. Un modèle, de type système expert, a été élaboré pour combiner dans un Système d'Information Géographique les principaux paramètres explicatifs de l'érosion des sols et pour cartographier les risques d'érosion en chaque saison à l'échelle de la France. Un exemple d'application de ce modèle au département de l'Aisne est présenté.

Le résultat cartographique permet de faire un état des lieux de l'aléa érosion sur le département ; il pourrait aussi constituer le point de départ à la mise en œuvre d'une gestion coordonnée des actions de lutte contre l'érosion des sols. Une réactualisation sera possible, après mise à jour des données CORINE land Cover (2004) ou du RGA. On pourra ainsi comparer l'évolution des surfaces sensibles à l'érosion, et mesurer l'impact potentiel de la modification des paysages.

Les résultats de ce modèle peuvent aussi servir à hiérarchiser et sélectionner des bassins versants particulièrement sensibles à l'érosion des sols qui pourraient servir de références pour simuler, à l'aide de modèles plus fins, différents scénarios d'aménagements et d'événements climatiques extrêmes. Il s'agit donc d'un outil de gestion pour la protection des sols et de l'environnement. Ce type d'application pourrait être envisagé dans l'ensemble des régions dans lesquelles les données cartographiques sur les sols sont disponibles.

Mots clés

Erosion, sols cultivés, aléa, types d'érosion, cartographie, Système d'Information Géographique.

SUMMARY**SOIL EROSION RISK MODELLING AND MAPPING AT REGIONAL SCALE. An example for Aisne Departement (France)**

Surface runoff and soil erosion are major threats for sustainable agriculture. Mapping regional erosion risk is increasingly needed by national environment agencies. Because erosion results from the interaction of several parameters which vary in space and time, no simple model allows taking it into account, particularly in cultivated areas where human factors are predominant. Geographical Information System (GIS) and numerical cartography may allow the development of multivariate models for the assessment of erosion risks. The various erosion factors have been hierarchised for different geographical situations and erosion mechanisms have been expressed with the help of expert rules. The soil crustability is considered as a key factor in runoff and erosion risk on cultivated soils. A geographical database has been created for the french territory, and a model allowing erosion risk mapping has been developed. It uses expert rules to combine data on soil crustability and soil erodibility (determined by pedotransfer rules), land use (Corine land cover database), a Digital Elevation Model (National Geographic Institute) and meteorological data (Météo-France). They have been integrated using various spatial integration units (administrative or environmental units). An example of application of this model to the french Département de l'Aisne is presented here.

This study shows that the main trends of regional runoff and erosion risks in the study area may be obtained from statistical and cartographical analysis of the various factors selected in the database. These results may also be used as a planning tool for regional management of anti-erosion schemes. It could be updated as soon as new data will be available, allowing the assessment of the temporal evolution of erosion risks in relation with land use changes.

This model can be used in any region where all input data, including soil map at sufficient scale, are available.

Key-words

Erosion, cultivated soils, erosion types, risk, mapping, Geographical Information System.

RESUMEN**MODELIZACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE EROSIÓN DE LOS SUELOS A ESCALA REGIONAL : Ejemplo del departamento del Aisne**

La erosión de los suelos presenta un riesgo importante para los espacios agrícolas y las zonas situadas río abajo : pérdida en tierra, coladas de barro, turbiedad y contaminación de las aguas. Más allá de la erosión bien conocida que existe en montaña y en los viñedos en loma, diferentes tipos de fenómenos de erosión fueron puestos en evidencia más recientemente en las regiones de agricultura : erosión difusa y erosión de "talwegs" por concentración del escurimiento producido por grandes parcelas agrícolas impermeabilizadas por batidez y la compactación de los suelos, erosión en zanjas sobre las lomas en cultivos de primavera. Estos fenómenos de erosión de los suelos resultan de la interacción entre numerosos parámetros, cuyos ciertos son permanentes como los relativos al suelo o a la topografía, mientras que otros evolucionan con el tiempo o presentan un carácter aleatorio como las precipitaciones. Un modelo, de tipo sistema experto, se elaboro para combinar en un sistema de información geográfico los principales parámetros explicativos de la erosión de los suelos y para cartografiar los riesgos de erosión en cada estación a escala de Francia. Se presenta un ejemplo de aplicación de este modelo al departamento del Aisne.

El resultado cartográfico permite presentar un estado actual del riesgo de erosión en el departamento ; podría así constituir el punto de partida de la constitución de una gestión coordinada de las acciones de lucha contra la erosión de los suelos. Una nueva actualización será posible, después de actualizar los datos CORINE land Cover (2004) o del RGA. Se podría así comparar la evolución de las superficies sensibles a la erosión, y medir el impacto potencial de la modificación de los paisajes.

Los resultados de este modelo pueden también servir a jerarquizar y seleccionar cuencas particularmente sensibles a la erosión de los suelos que podrían servir de referencia para simular, con ayuda de modelos más finos, diferentes escenarios de manejos y de eventos climáticos extremos. Así es una herramienta de gestión para la protección de los suelos y del medio ambiente. Este tipo de aplicación podría ser previsto para todas las regiones en las cuales los datos cartográficos sobre suelos son disponibles.

Palabras claves

Erosión, suelos cultivados, riesgo, tipos de erosión, cartografía, sistema de información cartográfico.

L'érosion des sols représente un risque important pour les espaces agricoles et les zones situées à l'aval : pertes en terre, coulées de boue, turbidité et pollution des eaux. De nombreuses références indiquent que les phénomènes d'érosion des sols se produisent dans de nombreuses régions, en France et en Europe, en dehors des zones de montagne et de la région méditerranéenne classiquement considérées comme susceptibles à l'érosion (Henin et Gobillot, 1950 ; Auzet, 1987 ; De Ploey, 1989). Les zones de grandes cultures sur sols limoneux apparaissent parmi les plus sensibles à l'érosion du fait de l'évolution des systèmes de culture et des pratiques culturales (Monnier *et al.*, 1986 ; Boiffin *et al.*, 1988 ; Papy et Douyer, 1991 ; King et Le Bissonnais Y., 1992 ; Souchère *et al.*, 2003). Dans le contexte de la nouvelle loi sur la protection des risques naturels (juillet 2003), il existe un besoin important de connaissance de la répartition spatiale de l'aléa érosion des sols de la part des responsables de l'aménagement du territoire et des gestionnaires de l'environnement.

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 (Le Bissonnais *et al.*, 2002). 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.

La possibilité d'une cartographie de l'aléa érosion est donc fonction d'une part de l'existence de données spatialisées décrivant ces facteurs, et d'autre part de l'existence de modèles opérationnels capables de décrire les processus et d'évaluer l'intensité de l'érosion à partir des données disponibles (Wischmeier et Smith, 1978 ; King *et al.*, 1998 ; Kirkby *et al.*, 2000).

Les paramètres de l'érosion sont les différentes informations qui peuvent permettre de caractériser les facteurs de l'érosion en vue d'une modélisation. Par exemple, la pente est un paramètre pouvant caractériser le facteur topographie, de même que la dénivelée, l'altitude moyenne, etc. Des choix sont donc nécessaires pour caractériser chacun des facteurs évoqués. De plus, le choix du type et de la complexité du modèle doit être fait en cohérence avec les informations disponibles en terme de processus et de données. Le plus souvent, ces choix résultent d'un compromis entre la connais-

ce 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 à l'échelle régionale, et on retiendra donc dans ce travail les hauteurs de pluie cumulée, pondérées par une information sur l'intensité des précipitations. En ce qui concerne les sols, il est nécessaire de disposer de cartes ou synthèses pédologiques suffisamment précises et informées sur les caractéristiques des horizons de surface, permettant ainsi d'en évaluer la sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique.

L'objectif de cet article est de proposer une démarche de modélisation opérationnelle pour l'évaluation de l'aléa érosion. Cette démarche est basée sur la combinaison de paramètres caractérisant les principaux facteurs de l'érosion et disponibles de manière exhaustive sur de larges territoires. On expose dans un premier temps les principes de la modélisation puis la structure de la base de données spatialisées nécessaire. Un exemple d'application de la méthode au département de l'Aisne est ensuite présenté.

PRINCIPES DE LA MODÉLISATION

Dans l'approche présentée ici, l'érosion est 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 approche réside dans la différenciation saisonnière de l'aléa qui permet de rendre compte de la réalité des différents régimes climatiques. 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.

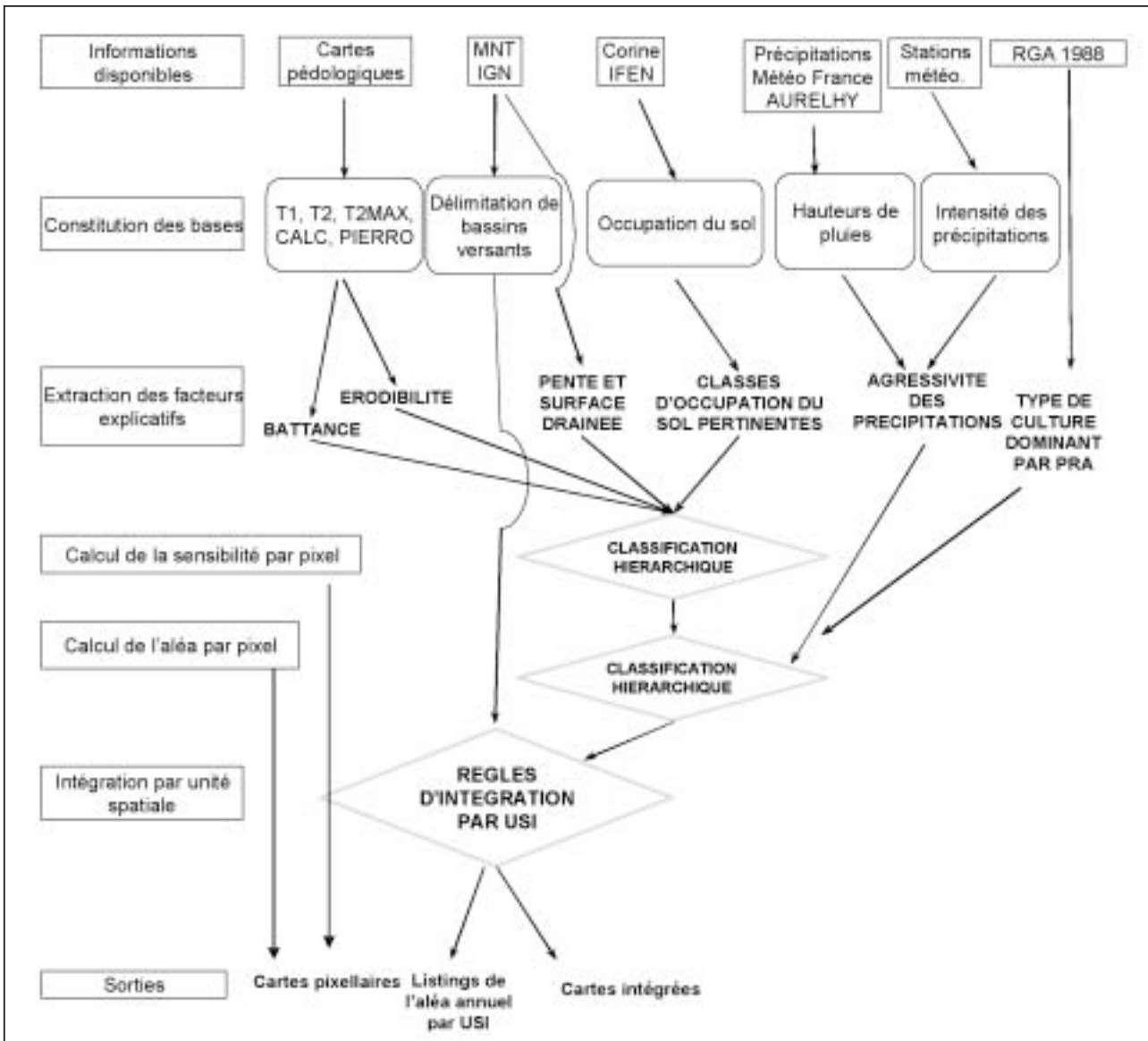
Étapes de la modélisation et de la cartographie

Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude reprend et affine la méthodologie mise au point dans le cas de l'étude de l'aléa érosion France (Le bissonnais *et al.*, 1998, 2002).

Le modèle est de type système expert, utilisant une méthode de croisement de paramètres sous forme de combinaisons logiques. Les paramètres sont hiérarchisés et pondérés à partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs.

Figure 1 - Organigramme des étapes du projet

Figure 1 - Flow diagram of modelling and mapping stages



T1 : texture de l'horizon de surface

T2 : texture de l'horizon sous-jacent

CALC : teneur en calcaire

PIERRO : pierrosité

A chaque combinaison est affectée une classe 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 est d'abord maillée au pas de 50 m, pixel défini par la plus petite unité spatiale informée (maille du modèle numérique de terrain).

La cartographie de l'intensité de l'aléa érosion est réalisée en plusieurs étapes (figure 1) : après avoir créé une base de données (couvertures thématiques) en sélectionnant les paramètres de l'érosion

correspondant aux données d'entrée du modèle, la cartographie elle-même est 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 à la résolution des mailles élémentaires ;

Etape 2 : évaluation de l'*aléa moyen d'érosion saisonnier* obtenu par croisement de la sensibilité potentielle avec les précipita-

tions moyennes saisonnières pour chaque maille élémentaire ;
Etape 3 : intégration de l'aléa par unité spatiale (bassin versant hydrographique, cantons, communes, bassins versants).

Hierarchisation 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 sensibilité à la battance, puis la topographie (pentes et surface drainée), l'érodibilité des terrains et enfin les caractéristiques des précipitations (*figure 2*).

Un arbre de décision spécifique est associé à chaque type d'occupation du sol, donnant un poids différent à chacun des paramètres. En effet, la couverture végétale est considérée comme le facteur d'ordre 1 de l'Aléa Erosion. À la suite du croisement de ces paramètres, on définit 5 classes (très faible, faible, moyen, fort, très fort), exprimant la sensibilité « agro-pédo-géomorphologique » potentielle de chaque maille.

Les principes généraux utilisés pour la pondération des paramètres sont les suivants :

- Seuls les sols nus et les sols cultivés sont sensibles à la battance. Elle n'a pas d'influence sur les prairies et les forêts ;
- L'influence de la pente augmente quand elle est associée à la battance ;
- Le facteur érodibilité intervient uniquement dans le cas des pentes fortes.

La 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. L'effet du climat augmente avec la sensibilité à l'érosion, par exemple dans des cas de très faible sensibilité à l'érosion (par exemple sols couverts en permanence sur faible pente), l'aléa reste très faible quelque soit l'érosivité des pluies.

Unités Spatiales d'Intégration

Les résultats obtenus sont à l'échelle des mailles élémentaires (grille de 50 m x 50 m). Pour en faciliter la lecture et l'interprétation à l'échelle régionale, ils peuvent être intégrés selon différentes unités spatiales d'intégration (USI). Plusieurs types d'unités ont été envisagés :

- des bassins versants, extraits à partir du MNT pour deux échelles différentes : petits bassins élémentaires d'environ 10 km² qui sont les unités spatiales de fonctionnement des processus, et grand bassins versants correspondant aux principaux cours d'eau ;
- des unités administratives : commune et canton qui permettent la confrontation avec d'autres sources d'information disponibles selon le même découpage et qui correspondent à des unités décisionnelles.

CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES SPATIALISÉES DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE DU MODÈLE

La première étape consiste à créer des couvertures (couche d'information spatialisée) à partir des données disponibles. On peut distinguer une phase de collecte et de vérifications des données disponibles, puis une phase de réalisation de couvertures intermédiaires de synthèse à partir des données de base, notamment pour la battance et l'érodibilité des sols, ainsi que pour l'indice topographique et l'érosivité de la pluie.

Les données d'entrée doivent être homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude. Dans l'exemple du Département de l'Aisne, il s'agit :

- des 80 cartes des sols réalisées par la chambre d'agriculture de l'Aisne,
- de l'occupation du sol issue de la base Corine Land Cover de l'IFEN[®],
- de la BD Alti[®] de l'IGN,
- de données météo, sources Météo France,
- du type de culture dominant par petite région agricole issue du dernier RGA, source Scees.

Les données sur les sols

L'élaboration de la base de données sur les sols repose sur la carte pédologique du département de l'Aisne au 1/25000 (Chambre d'Agriculture). Ces cartes ont été levées entre 1958 et 1979.

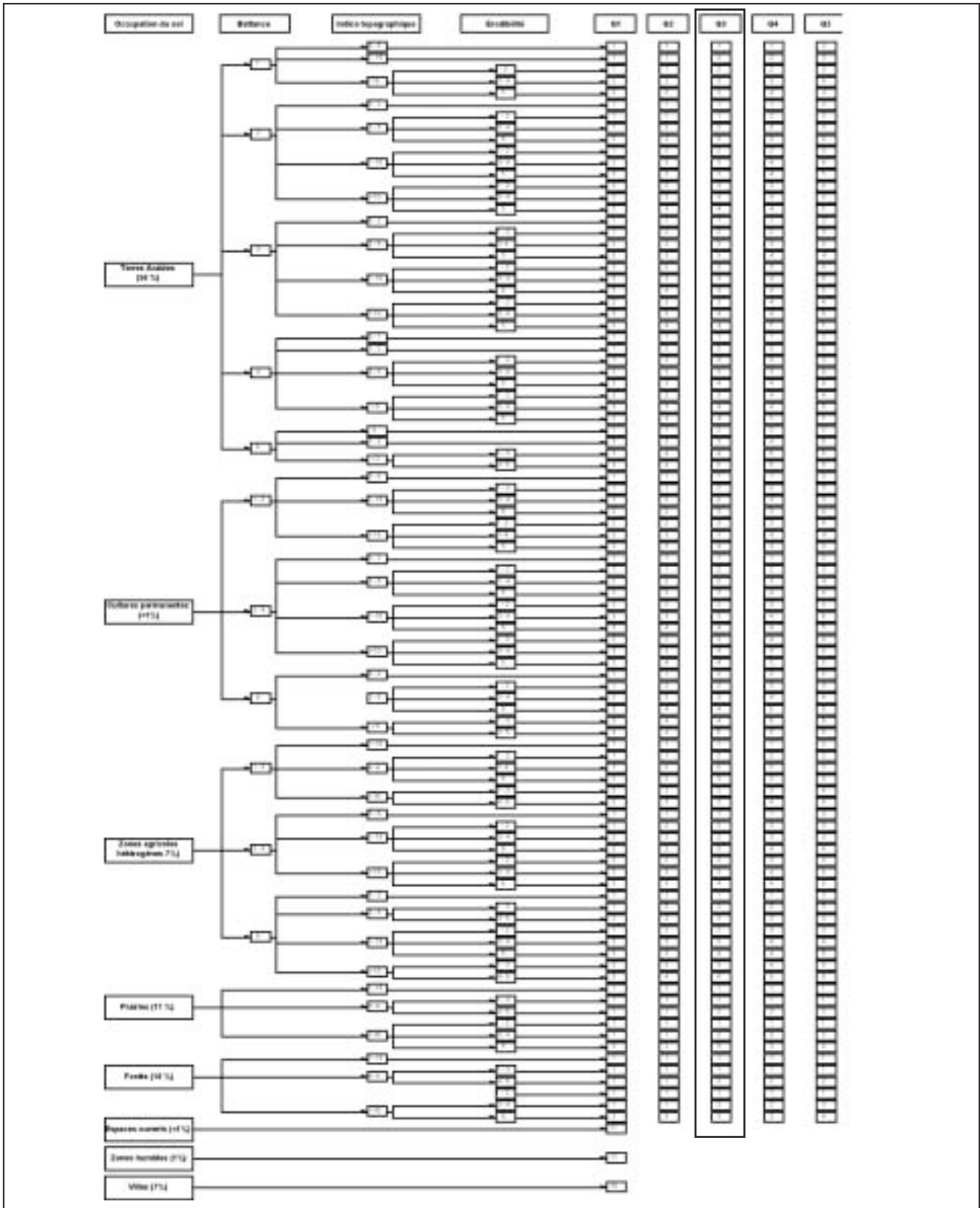
Cette carte est numérisée et contient pour chaque unité cartographique un certain nombre de paramètres : texture (nature, profondeur d'apparition) (*planche 1*), nature du substrat, hydromorphie, teneur en calcaire, pierrosité.

Des couvertures thématiques des déterminants principaux de l'érosion sont nécessaires pour appliquer le modèle. Il s'agit d'établir une relation entre les informations contenues dans la base de données des sols et leur comportement vis-à-vis des mécanismes principaux de l'érosion. Des règles de pédo-transfert (Bouma & Van Lanen, 1986 ; Daroussin & King, 1996) 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. La battance et l'érodibilité sont codés en 5 classes, de peu sensible à très sensible (*planche 2*).

Règles de pédo-transfert

Le paramètre d'ordre 1 pour la battance comme l'érodibilité est la texture de l'horizon de surface. Le *tableau 1* donne la valeur initiale de la battance et de l'érodibilité basée sur la texture de surface. Cette valeur est ensuite affinée en prenant en compte les autres paramètres comme la texture de l'horizon sous-jacent et sa pro-

Figure 2 - Modèle arborescent pour le calcul de l'aléa d'érosion
Figure 2 - Tree model for erosion risk assessment



fondeur, la teneur en calcaire, la pierrosité et enfin une estimation de la teneur en matière organique établie à partir de la couverture de l'occupation du sol.

Par exemple, si on a une texture de surface correspondant à des limons moyens mais que l'horizon sous-jacent, peu profond (moins de 30 cm) est composé de limons argileux alors on attribuera une sensibilité à la battance de 4 au lieu de 5 car on estime que des mélanges peuvent intervenir lors du labour. Si la pierrosité est importante on diminue aussi d'une classe la sensibilité à la battance.

Les règles de décision retenues sont les suivantes :

Pour la battance :

On note : T1 la texture de l'horizon de surface, T2max la profondeur d'apparition de la deuxième texture, et T2 pour la seconde texture.

Lorsque T1 est constituée de LM ou de LMS (ou LL ou LLS) :

Condition 1 : si $T2_{max} \leq 30$ cm et T2 constituée de LA ou LAS ou AL ou A, alors la battance est égale à 4 (au lieu de 5)

Condition 2 : si l'intensité de la pierrosité est forte ou très forte alors la battance est égale à 4 (au lieu de 5).

Condition 3 : si la teneur en calcaire est supérieure à 12,5 %, alors la battance est égale 4 (au lieu de 5).

Lorsque T1 est constituée de LA ou LAS :

Condition 4 : si $T2_{max} \leq 30$ cm et T2 constituée de LM ou LMS ou AL ou A, alors la battance est égale 4 (au lieu de 3).

Pour toutes les textures sauf ALO et Lc, les conditions 2 et 3 diminuent d'une classe la battance.

Pour l'érodibilité :

Pour toutes les textures sauf ALO et Lc, les conditions 2 et 3 diminuent d'une classe l'érodibilité

Prise en compte indirecte de la teneur en Matière Organique

L'analyse statistique de données de teneur en matière organique à l'échelle nationale montre que sous forêt et prairie, la teneur en Matière Organique est en moyenne environ deux fois plus importante que dans les zones cultivées. On a donc choisi de tenir compte de cette information fournie par l'occupation du sol et de diminuer la sensibilité à la battance et l'érodibilité d'une classe des sols sous prairie et forêt.

La prise en compte de la matière organique à ce stade ne modifie pas le résultat final du modèle, mais permet de fournir des cartes de battance et d'érodibilité plus fidèles à la réalité au moment de la réalisation de la base de données sur l'occupation du sol.

L'occupation du sol

À partir de la base de données Corine Land Cover, l'occupation du sol est reclassée en 7 classes sur l'ensemble du département,

chacune ayant un comportement spécifique vis-à-vis de l'érosion.

Les 7 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 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. On y a associé les zones remaniées de la carte des sols.

Ces données Corine Land Cover ont été élaborées à partir d'images satellites de la période 1985 à 1992. Une mise à jour est actuellement en préparation par l'IFEN. Ces nouvelles données pourront être introduites dans le modèle dès qu'elles seront disponibles. Il sera ainsi possible de mettre à jour la cartographie de l'aléa érosion des sols et d'estimer l'évolution temporelle de cet aléa sur une quinzaine d'années.

Indice topographique combinant pente et surface drainée

La BD Alti® de l'IGN au pas de 50 m permet d'estimer deux paramètres topographiques, la pente moyenne et l'aire drainée (sur l'Aisne la BD Alti® a été calculée à partir des courbes de niveau des cartes au 1/25 000, équidistance 5 m).

La pente moyenne de chaque maille de 50 m x 50 m est calculée d'après la différence d'altitude la plus grande entre la maille et ses 8 voisines. Les valeurs sont regroupées en 8 classes : 0-1 % ; 1-2 % ; 2-5 % ; 5-10 % ; 10-15 % ; 15-30 % ; 30-75 % ; > 75 %.

Les 3 premières classes permettent de différencier l'intensité de l'aléa dans les zones de grandes cultures. Sur ces terrains, lorsque les sols sont sensibles à la battance, une petite augmentation locale de pente peut être à l'origine d'une aggravation importante de l'aléa érosion.

la surface « drainée » (aire de l'impluvium) est obtenue par un algorithme qui calcule le nombre de mailles en amont contribuant aux écoulements passant par chaque maille. Les valeurs sont regroupées en 3 classes. Les seuils retenus correspondent à une

surface drainée de 0,75 et 5 ha et permettent de découper le réseau en 3 zones: la zone amont (< 0,75 ha), les zones intermédiaires (0,75 à 5 ha) et les thalwegs (> 5 ha).

Ces 2 paramètres liés à la topographie ont été combinés, la carte résultante correspond à une estimation de l'érosivité du ruissellement que l'on a appelé « pentes reclassées ». Une surface drainée moyenne ou forte augmente respectivement la classe de pente de 1 ou 2 niveaux (les mailles comportant des pentes supérieures à 30 % ne changent pas).

Le climat

Les données climatiques sont constituées par 2 cartes :

La carte des hauteurs moyennes mensuelles de précipitation sur 30 ans

Elle est issue de la méthode Aurélhy (Benichou et Lebreton, 1987) qui tient compte de « l'environnement topographique » des stations météo et du relief. C'est une carte rasterisée au pas de 5 km (grille de 5 km x 5 km). Les valeurs sont reclassées en quintiles de précipitations moyennes pour chaque saison climatique, 2 quintiles de précipitations inférieures à la moyenne, et 2 quintiles de précipitations supérieures à la moyenne.

La carte des intensités de précipitations

Les données proviennent de stations météo du réseau national des stations avec des données au pas horaire (90 sur toute la France). Elle correspond à la fréquence en nombre de jours par an d'événements pluvieux orageux (pluies d'intensité supérieure à 15 mm/h). La maille de la carte est la même que celle des hauteurs. Seul le sud du département est touché en été par des événements de ce type.

L'érosivité des pluies est la combinaison de ces deux facteurs. Des intensités moyennes ou fortes augmentent respectivement la classe de précipitations de 1 ou 2 niveaux. On obtient pour chaque saison, une carte d'érosivité des pluies en cinq classes.

Type de culture dominant par petite région agricole

À partir du RGA on a pu déterminer le type de culture dominant par petite région agricole. Ainsi, il est possible de préciser l'occupation du sol et de pondérer les résultats du modèle par saison. Au printemps par exemple le couvert végétal est plus développé sur les cultures d'hiver, en été le couvert végétal est plus développé quelle que soit la culture.

Cette information peut être remise à jour avec les données de chaque nouveau RGA.

CALCUL DE LA CLASSE D'ALÉA D'ÉROSION

Le calcul de l'aléa d'érosion des sols est fait en deux temps, d'abord le calcul de la sensibilité des sols à l'érosion, puis on ajoute la prise en compte des informations météorologiques.

Sensibilité des sols à l'érosion

Dans un premier temps la sensibilité des terrains au ruissellement et à l'érosion est évaluée sur toute la région, au pixel de 50 m, à partir de l'occupation du sol, de la sensibilité à la battance, de l'érodibilité du sol et d'un indice combinant pente et surface drainée. La classification est faite de façon hiérarchique en considérant la combinaison des différents paramètres terrains (1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyen, 4 = assez fort, 5 = très fort). La colonne centrale de la figure, encadrée correspond au paramètre sensibilité potentielle des sols à l'érosion, qui ne tient pas compte du climat.

Aléa d'érosion des sols

Pour chacune des combinaisons de ces facteurs, la sensibilité des terrains à l'érosion définie précédemment, est augmentée ou diminuée en fonction d'un indice combinant intensité et hauteur des précipitations, classées en quintiles (Q1 = indice de précipitations faible, à Q5 = fort), afin d'obtenir un niveau d'aléa pour ces terrains (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 (*planche 3*).

On utilise cet arbre pour chaque saison climatique. Par 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 (classes 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).

De plus, on apporte un correctif aux résultats du modèle d'érosion à l'aide de la connaissance du type de culture dominant par petite région agricole d'après le RGA pour tenir compte de la présence d'un couvert végétal au printemps et en été sur les terres arables. Au printemps le couvert végétal est plus développé sur les cultures d'hiver que sur les cultures de printemps donc on diminue d'une classe l'aléa des pixels correspondants.

INTÉGRATION DE L'INFORMATION PAR UNITÉ SPATIALE

Lorsque des décisions sont à prendre pour lutter contre un phénomène tel que l'érosion des sols, c'est généralement au niveau des entités administratives qu'elles se prennent. Ces entités, qui correspondent chacune à un territoire, constituent des unités spatiales de prise de décisions. Il est donc intéressant de caractériser globalement chaque entité par son niveau de sensibilité issu du modè-

Planche 2 - Carte de sensibilité à la battance du département de l'Aisne.

Plate 2 - Map of surface crusting for Aisne department

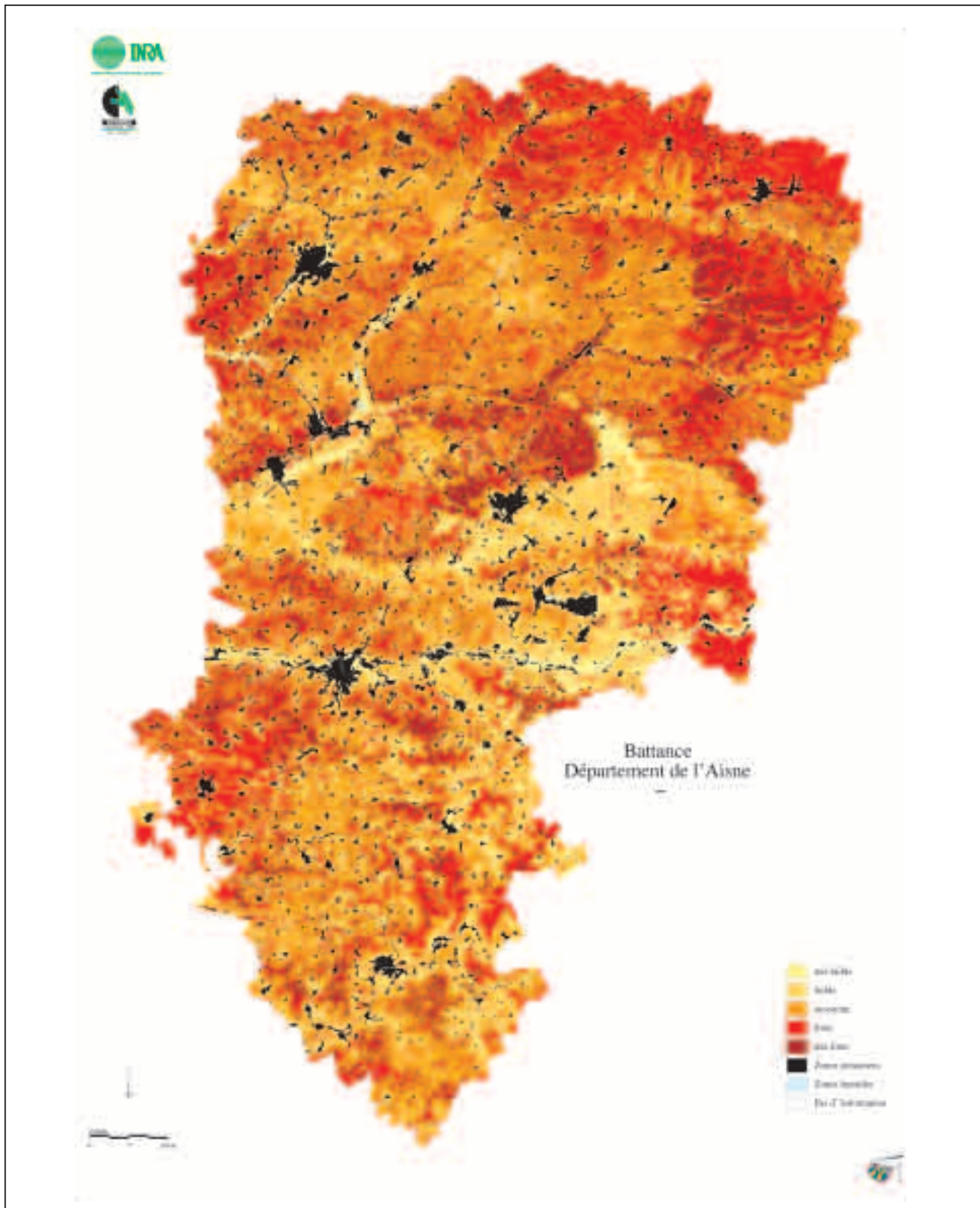


Planche 3 - Carte de l'aléa érosion annuel du département de l'Aisne

Plate 3 - Map of annual erosion risk for Aisne department

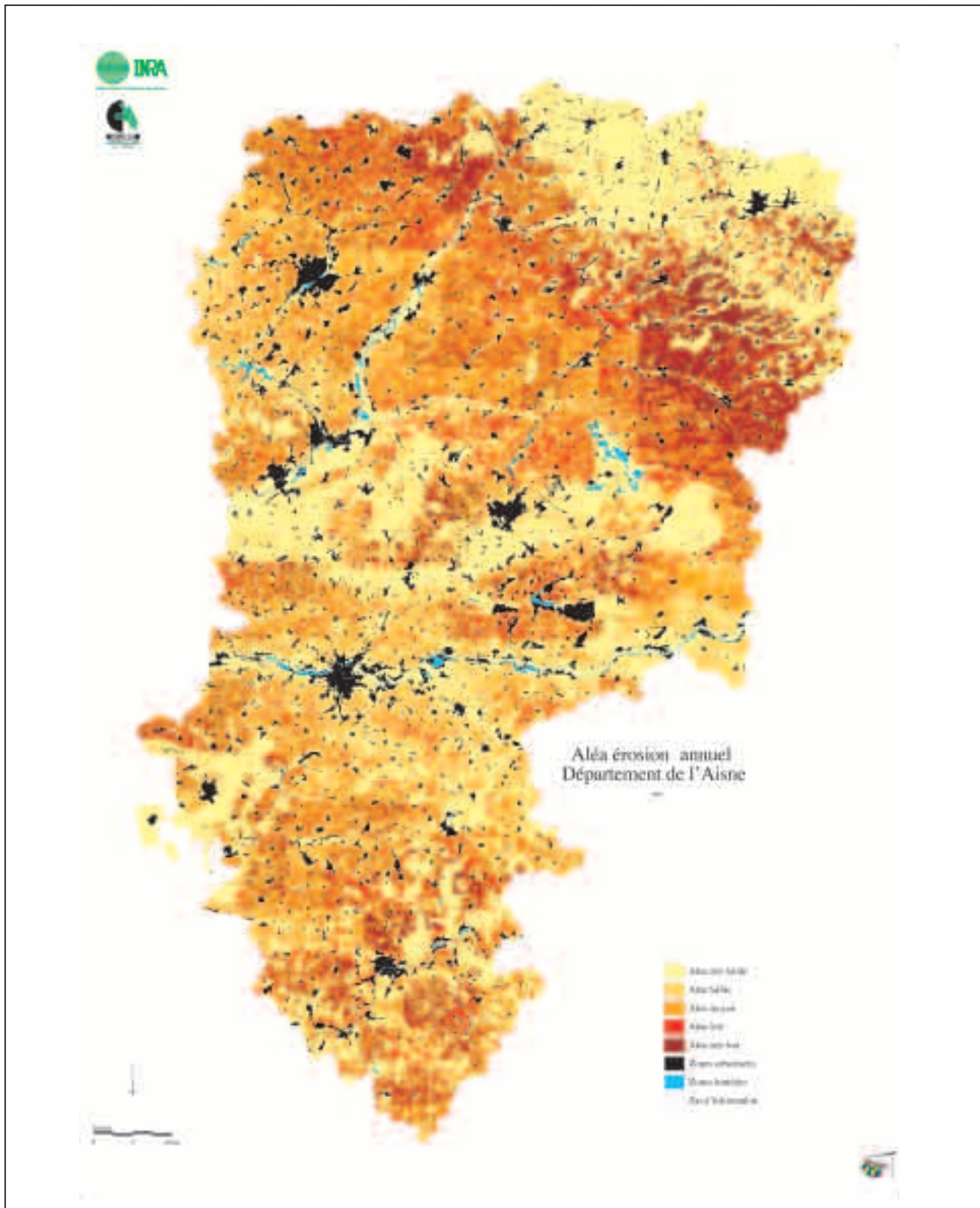


Planche 4 - Carte de l'aléa érosion du département de l'Aisne intégré par bassin versant pour chaque saison.

Plate 4 - Map of seasonal erosion risk for Aisne department integrated by catchment.



Tableau 1 - Règles de pédo-transfert de base**Table 1** - Pedotranfer rules for crusting and erodibility

Texture de surface (T1)	battance	érodibilité
ALO : argile lourde	1	1
AL : argile limoneuse	2	2
AS : argile sableuse	1	2
A : argile	2	2
S : sable	2	5
SA : sable argileux	2	4
SL : sable limoneux	3	5
LM : limon moyen	5	4
LMS : limon moyen sableux	5	4
LS : limon sableux	4	4
LA : limon argileux	3	3
LAS : limon argilo sableux	3	3
LSA : limon sablo argileux	3	3
LL : limon léger	5	5
LLS et LSL : limon léger sableux	5	5
LC : limon crayeux ($\text{CaCO}_3 > 50\%$)	3	3
t : pseudo-tourbe ($12,5 < \text{MO} < 25\%$)	1	1
T : tourbe ($\text{MO} > 25\%$)	1	1
888:zones remaniées	-	-
777 : plan d'eau	-	-

le ci-dessus. Ceci afin de permettre une comparaison aisée entre chaque entité.

Par ailleurs, les processus d'érosion fonctionnent généralement au niveau des bassins versants élémentaires (BVE), chacun d'eux ayant un fonctionnement indépendant des autres. Les BVE constituent ainsi des unités spatiales dites de fonctionnement. Ils sont généralement étudiés et caractérisés indépendamment les uns des autres lorsque l'on cherche à comprendre les facteurs qui déterminent les processus d'érosion (ex : mesures de flux à l'exutoire, de surface, de longueur de drainage, de pente moyenne, etc.). Il est donc intéressant de caractériser globalement chaque BVE par son niveau de sensibilité issu du modèle ci-dessus. Ceci afin de permettre une comparaison aisée, pour chaque BVE, entre la valeur fournie par le modèle et des indicateurs mesurés de la sensibilité.

Méthodologie d'extraction des bassins versants

Des bassins de deux échelles différentes sont extraits et serviront d'unités d'intégration de l'aléa de chaque maille de 50 x 50 m.

L'extraction des bassins à partir du MNT se fait en plusieurs étapes. La première consiste à choisir une valeur de seuillage pour

construire un réseau de drainage à partir du MNT. Puis, on extrait les nœuds de ce réseau, ils serviront d'exutoires lors du calcul des bassins versants. Ensuite, on teste la taille des bassins versants obtenus. Si les bassins sont trop petits, ils sont fusionnés avec le (ou les) bassins supérieurs ; ainsi on conserve la signification hydrologique de ces bassins. De même, s'ils sont trop grands, ils sont divisés en deux à partir d'un nouvel exutoire placé le long du réseau de drainage principal.

Ainsi, en utilisant les fonctions du SIG Arcinfo et l'algorithme décrit ci-dessus, il est possible d'extraire des bassins versants de taille homogène.

Ce travail a permis de réaliser deux couvertures de bassins versants, 16 grands bassins versants auxquels on a donné des noms correspondant aux cours d'eau principaux, et 1 392 petits bassins. Seuls les bassins inclus à plus de 80 % dans le département ont pu être renseignés, soit 1 198 petits bassins versants.

Intégration de l'information par unité spatiale

L'intégration automatique des aléas par Unité Spatiale d'Intégration 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 affectée une certaine valeur d'aléa ont été choisis à partir de l'analyse des résultats du modèle (tableau 2).

Cette règle est basée sur une logique de risque et non de protection. L'aléa intégré par USI sera par exemple 'très fort' si l'une des trois conditions suivantes est respectée :

- l'aléa est « très fort » pour un petit nombre de pixels (> 31 %),
- l'aléa est au minimum 'fort' pour un plus grand nombre de pixels (> 43 %),
- l'aléa est au moins 'moyen' pour un nombre important de pixels (> 62 %).

ANALYSE DES RÉSULTATS POUR LE DÉPARTEMENT DE L'AISNE

Pour analyser les résultats obtenus par le modèle, nous nous sommes appuyés sur les avis d'experts locaux de la chambre d'agriculture et de pédologues de l'INRA ayant levé les cartes pédologiques.

La figure 3 représente la répartition des unités d'intégration dans les différentes classes d'aléa. La visualisation simultanée des quatre cartes saisonnières d'aléa intégré par bassin versant met bien en évidence la variabilité interannuelle de l'aléa d'érosion des sols, mais aussi l'existence de régions systématiquement concernées (planche 4).

Ces résultats intégrés permettent d'individualiser trois types de régions :

- les régions où l'aléa d'érosion des sols est fort en toutes saisons : Sud-ouest de la Thiérache, région pour laquelle la carte des sols

Tableau 2 - Règle d'intégration de l'information pixellaire par USI à partir des pourcentages de surface de chaque classe d'aléa qu'elle contient

Table 2 - Spatial integration rules from percentages of the various risk classes

Ordre de priorité ^(a)	% de surface des aléas présents dans l'USI ^(b)	Aléa affecté à l'USI
6	aléa 5 \geq 31 % ou aléas 4+5 \geq 43 % ou aléas 3+4+5 \geq 62 %	Très fort (5)
6	19 % \leq aléa 5 \leq 31 % ou 28 % \leq aléas 4+5 \leq 42 % ou 40 % \leq aléas 3+4+5 \leq 61 %	Fort (4)
6	7 % \leq aléa 5 \leq 18 % ou 12 % \leq aléas 4+5 \leq 27 % ou 19 % \leq aléas 3+4+5 \leq 39 %	Moyen (3)
6	1 % \leq aléa 5 \leq 5 % ou 1 % \leq aléas 4+5 \leq 11 % ou 1 % \leq aléas 3+4+5 \leq 18 %	Faible (2)
5	sans information > 30 %	Pas d'information
4	surfaces en eau > 44 %	Zone humide
3	espaces ouverts > 21 %	Haute montagne
2	villes > 50 %	Zone urbaine
1	aléa 1 > 84 % ou aléa 5 < 2 % ou aléas 4+5 < 3 % ou aléas 3+4+5 < 6 %	Très faible (1)

Codes de l'aléa :

1 = aléa très faible

2 = aléa faible

3 = aléa moyen

4 = aléa fort

5 = aléa très fort

4+5 = aléa fort + aléa très fort

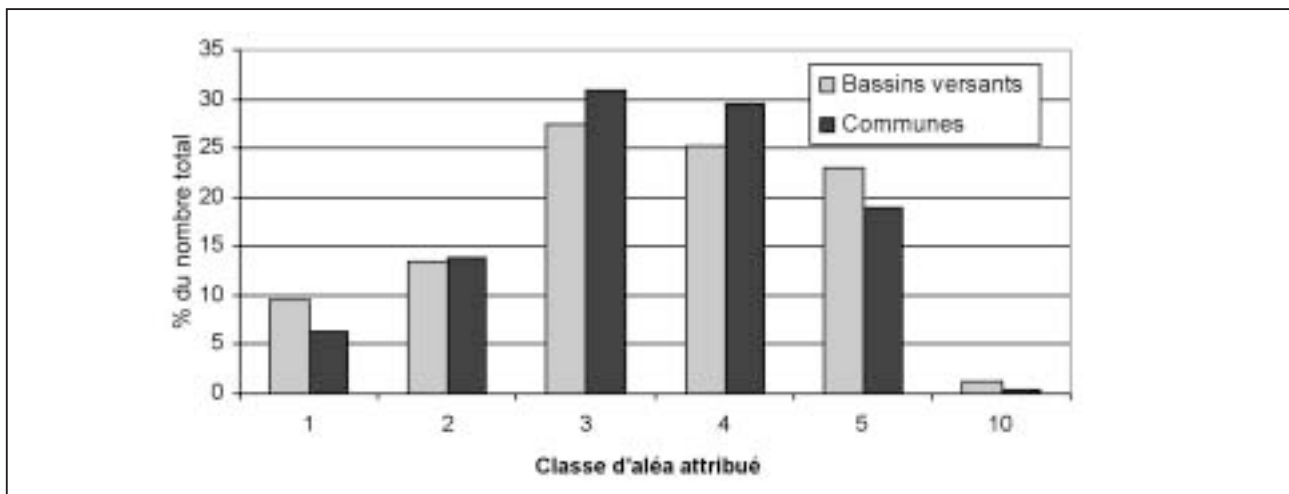
3+4+5 = aléa moyen + aléa fort + très fort

(a) *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, l'aléa le plus fort est retenu en cas de possibilités multiples.

(b) *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.

Figure 3 - Histogramme des fréquences de chaque type d'aléa, par bassins versants et par communes

Figure 3 - Histogram of risk class frequency by catchment and by commune



indique une forte proportion de limons moyens très battants, Sud du département (Tardenois et Brie) avec des pentes fortes le long de la vallée de la Marne ;

- les régions concernées par un aléa fort uniquement en automne et en hiver du fait du faible couvert végétal durant ces saisons pluvieuses : Saint-Quentinois et Laonnois, Valois, Soissonnais ;

- les régions moins concernées par l'érosion des sols : Nord de la Thiérache avec une forte proportion de prairies et de forêts, Champagne crayeuse avec des sols moins sensibles à la battance du fait de la présence de craie.

CONCLUSIONS

Le modèle présenté ici a été mis au point par l'INRA à l'occasion de différents projets d'étude de l'érosion. Il a été adapté aux données disponibles pour le secteur d'étude et affiné à partir de la connaissance des pédologues du département Science du Sol de l'INRA qui ont participé au levé des cartes pédologiques.

Les résultats pour le Département de l'Aisne montrent les grandes tendances de la répartition spatiale de l'aléa érosion (échelle des petites régions agricoles et des grands bassins hydrologiques), mais également la répartition plus fine de cet aléa à l'échelle des communes et des petits bassins versants. Ils permettent également d'identifier les facteurs responsables de cette distribution de l'aléa. Certains secteurs actuellement encore peu touchés grâce à une importante couverture de prairies et de forêts, comme le nord de la Thiérache, apparaissent potentiellement très vulnérables du fait de la sensibilité des sols à la battance.

Si ce travail permet de faire un état des lieux de l'aléa érosion sur le département, il pourrait aussi constituer le point de départ à la mise en œuvre d'une gestion coordonnée des actions de lutte contre l'érosion des sols.

Le modèle présenté pourra être réactualisé, après mise à jour des données CORINE Land Cover (2004) ou du RGA. On pourra ainsi comparer l'évolution des surfaces sensibles à l'érosion, et mesurer l'impact potentiel de la modification des paysages. Les résultats de ce modèle peuvent aussi servir à hiérarchiser et sélectionner des bassins versants particulièrement sensibles à l'érosion des sols qui pourraient servir de références pour simuler, à l'aide de modèles plus fins, différents scénarii d'aménagements et d'événements climatiques extrêmes.

La démarche présentée ici pourrait être appliquée dans toute région pour laquelle les données d'entrée nécessaires au modèle sont disponibles, en particulier une carte des sols à une échelle minimum du 1 : 250 000 du type de celles réalisées dans le cadre du programme IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols). Par ailleurs, des séries d'observations et de mesures sur des bassins tests représentatifs seraient nécessaires pour valider plus précisément les résultats du modèle et calibrer les classes pour fournir des valeurs quantitatives indicatives de l'érosion correspondant à chacune de ces classes.

BIBLIOGRAPHIE

- Auzet A.V., 1987 - L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Annales de géographie* n° 537 sept - oct. 1987, pp. 529 - 556.
- Benichou P., Lebreton O., 1987 - Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, série 7, 19.
- 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, pp. 663-673.
- 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.
- Daroussin J., King D., 1996 - Pedotransfer rules database to interpret the Soil Geographical Database of Europe for environmental purposes. *In: The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe. Workshop proceedings. Orléans, France. 10-12 octobre 1996*, pp. 25 - 40.
- De Ploey J., 1989 - Soil erosion map of western Europe. Published by CATENA. Laboratory of Experimental Geomorphology, Leuven, Belgium.
- Henin S., Gobillot T., 1950 - L'érosion en France. *Bull. Techn. info.*, 50, pp. 431-433.
- Jamagne M., Hardy R., King D., Bornand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 3, pp. 153-172.
- 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. Acad. Agric. Fr.*, 78, n° 6, pp. 91-105.
- King D., Fox D., Daroussin J., Le Bissonnais Y., Daneels V. 1998 - Upscaling a simple erosion model from small area to a large region. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 50, pp. 143-149.
- Kirkby M.J., Le Bissonnais Y., Coulthard T. J., Daroussin J. McMahon M. D., 2000 - The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, pp. 125 - 135
- Le Bissonnais Y., C. Montier, M. Jamagne, J. Daroussin, D. King, 1998 - Aspect cartographique de l'érosion des sols en France, *C. R. Acad. Agric.*, 84 n°7, pp. 125-139.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King D. 2002 - Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46, pp. 207-220.
- Le Bissonnais Y., Cros-Cayot S., Gascuel-Oudoux C. 2002. Topographic variation of aggregate stability at field scale: effect on runoff and erosion. *Agronomie*, 22, pp. 489-501.
- 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. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXII, n° 2, pp. 123-131.
- Papy F., Douyer C., 1991 - Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie*, 11 (3), pp. 201-215.
- Souchère V., King C., Dubreuil N., Lecomte V., Le Bissonnais Y. Chalal M., 2003 - Grassland decrease: role of socio-economic factors and consequences for runoff and soil erosion. *Environmental Science & Policy*, 6(1) pp. 7-16.
- Wischmeier W. H., Smith D. D., 1978 - Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. *US Department of Agriculture, agricultural handbook n° 537, Science and Education Administration USDA, Washington DC*. 58 p.

