

Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux

V. Antoni⁽¹⁾, Y. Le Bissonnais⁽²⁾, J. Thorette⁽¹⁾, N. Zaidi⁽³⁾, B. Laroche⁽³⁾, S. Barthès⁽⁴⁾, J. Daroussin⁽⁵⁾ et D. Arrouays⁽³⁾

(1) IFEN, 5 route d'Olivet - BP 16105 - 45061 Orléans Cedex 2

(2) INRA, LISAH Campus AGRO - 2 place Viala - 34060 Montpellier Cedex 1

(3) INRA, Unité INFOSOL, 2163 Avenue de la Pomme de Pin - BP 20619 Ardon - 45166 Olivet Cedex

(4) Chambre Régionale d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, Mas de Saporta, CS 30012, 34875 Lattes

(5) INRA, Unité de Science du Sol, 2163 Avenue de la Pomme de Pin - BP 20619 Ardon - 45166 Olivet Cedex

RÉSUMÉ

L'érosion est un des processus majeurs de la dégradation des sols. Il est donc primordial d'appréhender l'aléa érosif pour protéger la ressource sol. Nous avons appliqué un modèle hiérarchique, à l'aide d'un Système d'Information Géographique, pour cartographier l'aléa érosif des sols. Il combine différents paramètres, par ordre d'importance : occupation du sol, battance, pente, érodibilité, hauteur et intensité des pluies. Les facteurs de battance et d'érodibilité sont établis à partir de paramètres issus des bases de données pédologiques par des règles de pédo-transfert. L'étude a porté sur la région du Languedoc-Roussillon, d'une part parce qu'elle est couverte par une base de données pédologiques (BDSol-250) à l'échelle de 1/250 000 et d'autre part parce que la modélisation de l'aléa érosif à l'échelle régionale n'a pas encore fait l'objet d'une étude en milieu méditerranéen. Développée originellement pour d'autres études, cette modélisation a nécessité la définition de nouvelles règles de pédo-transfert appliquées à la BDSol-250 pour tenir compte des spécificités du milieu méditerranéen. Ces règles s'appuient sur le taux de pierrosité, la texture, ainsi que la teneur en matières organiques et en fer des horizons de surface des sols. La modélisation permet de cartographier les zones d'aléa érosif fort qui sont ensuite confrontées aux enjeux urbains, environnementaux (enjeu de qualité de l'eau) et économiques (enjeu viticole) identifiés en région Languedoc-Roussillon. Quatre indicateurs sont ainsi proposés : l'indicateur « coulées boueuses » (spatialisation du nombre de coulées boueuses par communes), l'indicateur « enjeu urbain » (combinaison de la densité de population, de l'évolution de la population et de l'artificialisation), l'indicateur de qualité de l'eau (teneurs en Matières en Suspension - MES - dans les eaux de surface), l'enjeu viticole enfin (spatialisation des zonages d'aptitude AOC). La confrontation des zones d'aléa et des zones d'enjeux montre l'intérêt de poursuivre ces investigations pour intégrer le risque érosif dans les politiques de prévention.

Mots clés

Erosion, aléa, contexte méditerranéen, modèle hiérarchique, règles de pédo-transfert, battance, érodibilité, texture, cartographie, Système d'Information Géographique, Modèle Numérique de Terrain, base de données sol, enjeux, artificialisation, matières en suspension (MES).

SUMMARY

MODELLING SOIL EROSION RISK WITH A REGIONAL PEDOLOGIC REFERENCE FRAME ON A 1 : 250,000 SCALE AND COMPARISON WITH THE STAKES

Soil erosion is a major process in soil degradation. In order to protect the soil resource, it is therefore essential to apprehend the erosion risk. We applied a hierarchical model within a Geographical Information System in order to map the soil erosion risk. This model combines several parameters, in order of their importance: land use, soil crusting, slope, soil erodibility and rainfall height and intensity. Soil crusting and soil erodibility factors are assessed through pedotransfer rules. The work focuses on the Languedoc-Roussillon region for two reasons. On the one hand because an accurate soil database is available for this region, namely the BDSoil-250 on a 1 : 250,000 scale, on the other hand because erosion risk modelling at regional scale has never been applied to Mediterranean areas before. New pedotransfer rules have been developed in order to adapt an existing model to the specificities of the Mediterranean milieu. These rules take into account the soil stoniness, the texture, the organic matter and iron contents. The modelling allows delineating the high erosion risk areas, which are then confronted with the human, environmental and economical stakes identified for the Languedoc-Roussillon region. Four indicators are proposed: mudflows indicator (delineation of the number of mudflows by municipalities), urban stake indicator (combination of the population density, the population evolution and the soil sealing evolution), water quality indicator (content of suspended matter - MES- in the surface water), wine stake (mapping of the AOC wine aptitude). The comparison between the erosion risk areas and the stakes areas shows the necessity to continue the investigations allowing the integration of the erosion risk in the preventing policies.

Key-words

Erosion, risk, Mediterranean context, hierarchical model, pedotransfer rules, soil crusting, soil erodibility, texture, mapping, Geographical Information System, Digital Elevation Model, soil database, stakes, soil sealing, suspended matters (MES).

RESUMEN

MODELIZACIÓN DEL RIESGO EROSIVO DE LOS SUELOS EN AMBIENTE MEDITERRÁNEO CON AYUDA DE UN REFERENCIAL REGIONAL PEDOLÓGICO AL 1/250000 Y CONFRONTACIÓN DE LAS PUESTAS LOCALES

La erosión es uno de los procesos mayores de la degradación de los suelos. Es primordial comprender el riesgo erosivo para proteger el recurso en suelo. Aplicamos un modelo jerárquico, con ayuda de un sistema de información geográfico, para cartografiar el riesgo erosivo de los suelos. Combina diferentes parámetros, por orden de importancia: uso del suelo, encostramiento superficial, pendiente, erodibilidad, altura e intensidad de las lluvias. Los factores de encostramiento superficial y de erodibilidad son establecidos a partir de parámetros que provienen de los bancos de datos pedológicos por reglas de pedo-transferencias. El estudio se llevó en la región de Languedoc-Roussillon, de una parte porque es cubierta por un banco de datos pedológicos (BDsuelo-250) a escala del 1/250 000 y de otra parte porque la modelización del riesgo erosivo a escala regional no hizo todavía objeto de un estudio en el medio mediterráneo. Desarrollada al principio para otros estudios, esta modelización necesitó la definición de nuevas reglas de pedo-transferencias aplicadas a la BDsuelo-250 para tener en cuenta las especificidades del medio mediterráneo. Estas reglas se apoyan sobre la tasa de pedregosidad, la textura, así que el contenido en materias orgánicas y en hierro de los horizontes de superficie de los suelos. La modelización permite cartografiar las zonas de riesgo erosivo fuerte que son confrontadas a continuación a las puestas urbanas, ambientales (puesta de la calidad del agua) e económicas (puesta vitícola) identificadas en la región Languedoc-Roussillon.

Cuatro indicadores son así propuestos: el indicador « coladas lodosas » (especialización del número de coladas lodosas por municipios), el indicador « puesta urbana » (combinación entre la densidad de población, la evolución de la población y de la artificialización), el indicador de la calidad del agua (contenidos en materias en suspensión – MES – en las aguas de superficie), en fin la puesta vitícola (especialización de las zonas de aptitud AOC). La confrontación de las zonas de riesgo erosivo y de las zonas de puestas muestra el interés de seguir estas investigaciones para integrar el riesgo erosivo en las políticas de prevención.

Palabras clave

Erosión, riesgo, ambiente mediterráneo, modelo jerárquico, reglas de pedo-transferencias, encostramiento superficial, erodibilidad, textura, cartografía, sistema de información geográfico, modelo numérico de terreno, banco de datos suelo, puestas, artificialización, materias en suspensión (MES)

L'érosion résulte de la dégradation des couches superficielles de la couverture pédologique et du déplacement des matériaux les constituant. Ce processus généré sous l'action d'agents climatiques naturels (eau, vent, rivières, glaciers) est souvent renforcé par les pressions anthropiques exercées sur les sols (intensification de l'agriculture, surpâturage, déforestation, culture à faible recouvrement, artificialisation et imperméabilisation des surfaces). Notre étude porte sur l'érosion hydrique des sols agricoles. Celle-ci a été étudiée dans les régions tempérées et de grandes cultures du Nord-Ouest de l'Europe depuis les années 1980 (Le Bissonnais *et al.*, 2005).

L'érosion hydrique caractérise le départ de sol sous l'action du ruissellement des eaux de pluies ne pouvant s'infiltrer dans le sol. Ce phénomène est accentué sous les conditions suivantes : occupation du sol peu couvrante, sols limoneux enclins à la fermeture de la porosité de surface générant une croûte de battance, pentes fortes, forte érodibilité des matériaux, agressivité des pluies. L'érosion hydrique touche 26 millions d'hectares dans l'UE et concernerait 26 fois plus de surface que l'érosion éolienne (Van Camp *et al.*, EUR 21319 EN/1 2004). Ce processus de dégradation des sols tend à être intégré dans les politiques de protection environnementale. Ainsi, au niveau européen, l'érosion a été identifiée comme l'une des huit menaces à prendre en compte dans la stratégie thématique pour la protection des sols en Europe (COM(2002) 179 final, 2002; Van Camp *et al.*, EUR 21319 EN/2 2004). En France, le décret d'application n° 2005-117 de la loi du 30 juillet 2003 (n° 2003-699) prévoit des mesures de lutte contre l'érosion des sols et la nécessité de « réaliser un zonage des risques d'érosion » sous la responsabilité des préfets. La mise en place au niveau local de cette politique de lutte contre l'érosion nécessite donc d'une part une connaissance approfondie des phénomènes érosifs et d'autre part leur spatialisation afin d'accompagner les prises de décision des gestionnaires de l'environnement (mesures agri-environnementales visant à limiter les phénomènes d'érosion, mesures de prévention des coulées boueuses...).

Différentes méthodes d'estimation de l'aléa érosion des sols sont couramment utilisées : CORINE, RIVM, GLASOD, Hot-Spot approach of EEA, USLE, INRA, PESERA (Van Camp *et al.*, EUR 21319 EN/2 2004). Le modèle retenu pour cette étude est le modèle INRA, qui permet l'utilisation de données de résolution et de qualité hétérogènes, qui est plus précis que le modèle CORINE érosion et enfin, qui ne nécessite pas l'utilisation de données non disponibles à notre échelle d'étude comme le modèle USLE (Le Bissonnais *et al.*, 2002). La modélisation de l'aléa érosif a été abordée à l'échelle régionale en France dès les années 1990. Une approche mécaniste des phénomènes érosifs n'étant pas envisageable à cette échelle, King *et al.*, (1991; 1993) montrent que l'appréhension des phénomènes érosifs nécessite l'intégration par USI (Unité Spatiale d'Intégration), d'un certain nombre de facteurs tels que la sensibilité des sols à la battance, la proportion de terres labourées et les précipitations.

Notre étude a pour but de tester la faisabilité d'une délimitation des zones à risques pour répondre aux demandes des préfets

de départements, pour les départements disposant de données pédologiques suffisamment précises. Dans ce contexte, nous avons travaillé sur la région Languedoc-Roussillon, d'une part parce qu'elle est couverte par un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000^e et qu'aucune expérience de zonage de l'aléa érosif n'a été réalisée à partir de ce type de base de données géographiques. D'autre part, l'aléa érosif n'a pas été estimé à l'échelle régionale en milieu méditerranéen jusqu'ici.

On expose dans un premier temps les principes de la modélisation en détaillant la méthode utilisée pour adapter au milieu méditerranéen la modélisation de l'aléa érosif précédemment développée dans le contexte d'autres études. Les résultats cartographiques obtenus sont ensuite discutés avant de confronter les zones d'aléa érosif fort avec les enjeux humains, environnementaux et économiques identifiés en région Languedoc-Roussillon. Cette confrontation devrait permettre de localiser les zones susceptibles de subir des dommages par rapport aux zones de départ potentiel de matériel érodé.

PRINCIPES DE LA MODELISATION DE L'ALEA EROSIF

Le modèle empirique le plus largement utilisé pour modéliser l'aléa érosif se base sur l'« Universal Soil Loss Equation » (USLE) qui permet d'évaluer des moyennes de volumes de sols érodés à long terme. Ce modèle est basé sur des données expérimentales (Wischmeier et Smith, 1978 in Vrieling, 2006). La spatialisation de l'équation empirique « Revised USLE » (RUSLE) a ainsi permis à Morschel et Fox (2004), Van der Knijff *et al.*, (2000)... d'aboutir à une carte du risque érosif en contexte méditerranéen, en quantifiant les quantités de sol susceptibles d'être détachées par érosion respectivement pour les collines du Terrefort Lauragais aux environs de Carcassonne et en Italie. D'autres modèles aboutissent à une spatialisation de l'aléa érosif à partir de données satellitaires et de MNT (Modèle Numérique de Terrain) comme le modèle « Soil Erosion Model for Mediterranean Regions » (SEMMED) appliqué en Ardèche (De Jong and Riezebos, 1997 in Vrieling, 2006) et en Sicile (De Jong *et al.*, 1999 in Vrieling, 2006).

Dans cette étude, nous utilisons un modèle de type système expert, hiérarchique et arborescent déjà utilisé pour modéliser l'aléa érosif à différentes échelles : France entière à 1/1 000 000^e (Le Bissonnais *et al.*, 2002), régionale en Haute-Normandie à 1/50 000^e (Souadi *et al.*, 2000), départementale dans l'Aisne à 1/25 000^e (Le Bissonnais *et al.*, 2004). Il est appliqué à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) par la combinaison logique de différents facteurs pris dans l'ordre de leur importance vis-à-vis du phénomène d'érosion des sols, à savoir (*planche 1*) : l'occupation du sol, la battance des sols, l'intensité de la pente, l'érodibilité des sols, l'érosivité des pluies (facteur combiné de leur hauteur et intensité) (Le Bissonnais *et al.*, 1998, 2002).

Les trois facteurs extrinsèques aux sols (occupation du sol, pente, érosivité des pluies), sont déterminés respectivement à partir des bases de données suivantes : CORINE Land Cover 1990 ou 2000 à l'échelle du 1/100 000^e, Modèle Numérique de Terrain de l'Institut Géographique National (MNT IGN) au pas de 250 m et données pluviométriques de Météo-France Aurhély au pas de 5 km.

Les deux facteurs intrinsèques aux sols (battance et érodibilité des sols), sont établis à partir de paramètres issus des bases de données pédologiques par des règles de pédotransfert (Daroussin et King, 1996). La battance traduit la sensibilité des sols à la fermeture de la porosité, formant une croûte superficielle qui colmate la surface du sol et réduit l'infiltration des précipitations. L'érodibilité traduit la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent sous l'action des gouttes de pluies et/ou de l'écoulement (Le Bissonnais *et al.*, 2005). Dans cette étude, la base de données pédologiques utilisée pour déterminer les facteurs de battance et d'érodibilité est la Base de Données des Sols du Languedoc-Roussillon (BDSol-250) à l'échelle du 1/250 000^e. La structure de la BDSol-250 combine une base géographique localisant spatialement des objets cartographiés et une base sémantique décrivant et gérant les objets au sein d'un Système de Gestion de Base de Données Relationnelles selon le principe de la base DONESOL (Grolleau *et al.*, 2004). Ainsi, BDSol-250 associe chaque Unité Cartographique de Sols (UCS) décrite par sa géométrie (ensemble de polygones) à une ou plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS), décrites par leur mode d'agencement et le pourcentage de surface qu'elles occupent au sein de l'UCS (Jamagne *et al.*, 1995). Les UTS sont elles-mêmes composées de strates ou couches de sol qui décrivent la variabilité spatiale latérale et verticale des paramètres du sol par les valeurs minimales, maximales et modales de variables qualitatives (descriptives) et quantitatives (données analytiques physico-chimiques). Seuls les horizons de surface sont susceptibles de subir les manifestations érosives (Le Bissonnais *et al.*, 2004). Les informations qui décrivent les strates de profondeur ne sont donc pas considérées dans cette étude. Enfin, seules les valeurs modales des variables qui nous intéressent sont prises en compte.

Adaptation au contexte méditerranéen

Les règles de pédotransfert appliquées à la Base de Données Géographique des Sols de France à l'échelle géographique de 1/1 000 000^e (BDSol-1M) et définies dans les études antérieures ont été adaptées pour tenir compte de la meilleure précision sémantique de la BDSol-250 et des spécificités des sols en milieu méditerranéen. Contrairement à la modélisation de l'aléa érosif appliquée à l'échelle de la France entière ou à l'échelle départementale de l'Aisne et du fait de la spécificité des sols de la région Languedoc-Roussillon, le paramètre d'ordre 1 retenu pour les facteurs de battance et d'érodibilité est la teneur en éléments grossiers et non la texture de l'horizon de surface (*figure 1*). La pierrosité favorise

l'infiltration au détriment du ruissellement, diminuant ainsi les phénomènes de battance et l'érodibilité. De nombreux travaux ont en effet montré que la présence d'éléments grossiers améliore la résistance au ruissellement en diminuant la dégradation physique de l'horizon de surface - réduction de la fermeture de la porosité de surface et diminution de la désagrégation des agrégats - et en augmentant la rugosité de surface, diminuant ainsi les taux d'érosion (Poesen *et al.*, 1992; Poesen et Van Wesemael, 1995; Van Wesemael *et al.*, 1995; Cerdan, 2001). Le facteur pierrosité est estimé de deux manières : par le taux d'éléments grossiers modal défini pour chaque strate de surface lorsque l'information est disponible et elle est complétée par la principale contrainte définie pour chaque UTS lorsque celle-ci est renseignée et porte sur la pierrosité.

Les valeurs de battance et d'érodibilité sont ensuite affinées par les données texturales des strates projetées dans des triangles de battance et d'érodibilité établis pour cette étude (*planche 2*), à partir de règles basées sur les mêmes principes que ceux présentés dans les études précédentes (Le Bissonnais *et al.*, 2002; 2004; 2005) et qui sont décrites ci-dessous.

Les classes de battance et d'érodibilité ainsi obtenues à partir de la teneur en éléments grossiers et de la texture sont à nouveau affinées par des règles de pédotransfert supplémentaires prenant en compte les teneurs en matières organiques et en fer qui favorisent la stabilité structurale des sols (Le Bissonnais *et al.*, 2005) (*figure 1*). En effet, sous climat méditerranéen, on trouve des sols pour lesquels la faible teneur en matières organiques peut être compensée par des teneurs en oxydes de fer importantes, limitant la formation d'une croûte de battance et l'érodibilité (Singer et Le Bissonnais, 1998).

Les seuils suivants ont été retenus sur une base phénoménologique, confortée par l'étude statistique de la distribution de ces différents paramètres : 10 % et 50 % pour le taux de pierrosité, 2 % et 5 % pour la teneur en matières organiques et 3 % pour la teneur en fer.

Règles de pédotransfert appliquées à BDSol-250 pour le Languedoc-Roussillon

Les quatre règles de pédotransfert retenues s'enchaînent de la manière suivante (*figure 1*) :

- La *règle 1* s'appuie sur le taux d'éléments grossiers qui est le paramètre d'ordre 1 pour la battance comme pour l'érodibilité.
- La *règle 2* prend en compte la texture de la strate de surface ou la teneur en argile. Un horizon est d'autant plus battant que sa texture est limoneuse. De même, un horizon de surface présentant une faible teneur en argile favorise l'érodibilité (Wischmeier et Mannering, 1969; Le Bissonnais *et al.*, 2005).

Les règles suivantes ne s'appliquent que dans les sols où la charge en éléments grossiers est inférieure à 50 %.

- La *règle 3* affine l'estimation de la battance et de l'érodibilité en considérant le taux de matières organiques. Lorsqu'il est élevé il diminue le caractère érodible ou battant du sol.

- La règle 4 affine les facteurs de battance et d'érodibilité en prenant en compte le taux de fer de la strate de surface.

Les classes de battance et d'érodibilité obtenues à l'issue de l'application de ces règles qualifient chaque UTS. Elles sont ensuite intégrées par UCS, chaque UCS étant qualifiée par la classe dominante de battance - respectivement d'érodibilité -. Ainsi obtient-on les variables sols nécessaires au modèle d'aléa érosif présenté *planche 1*.

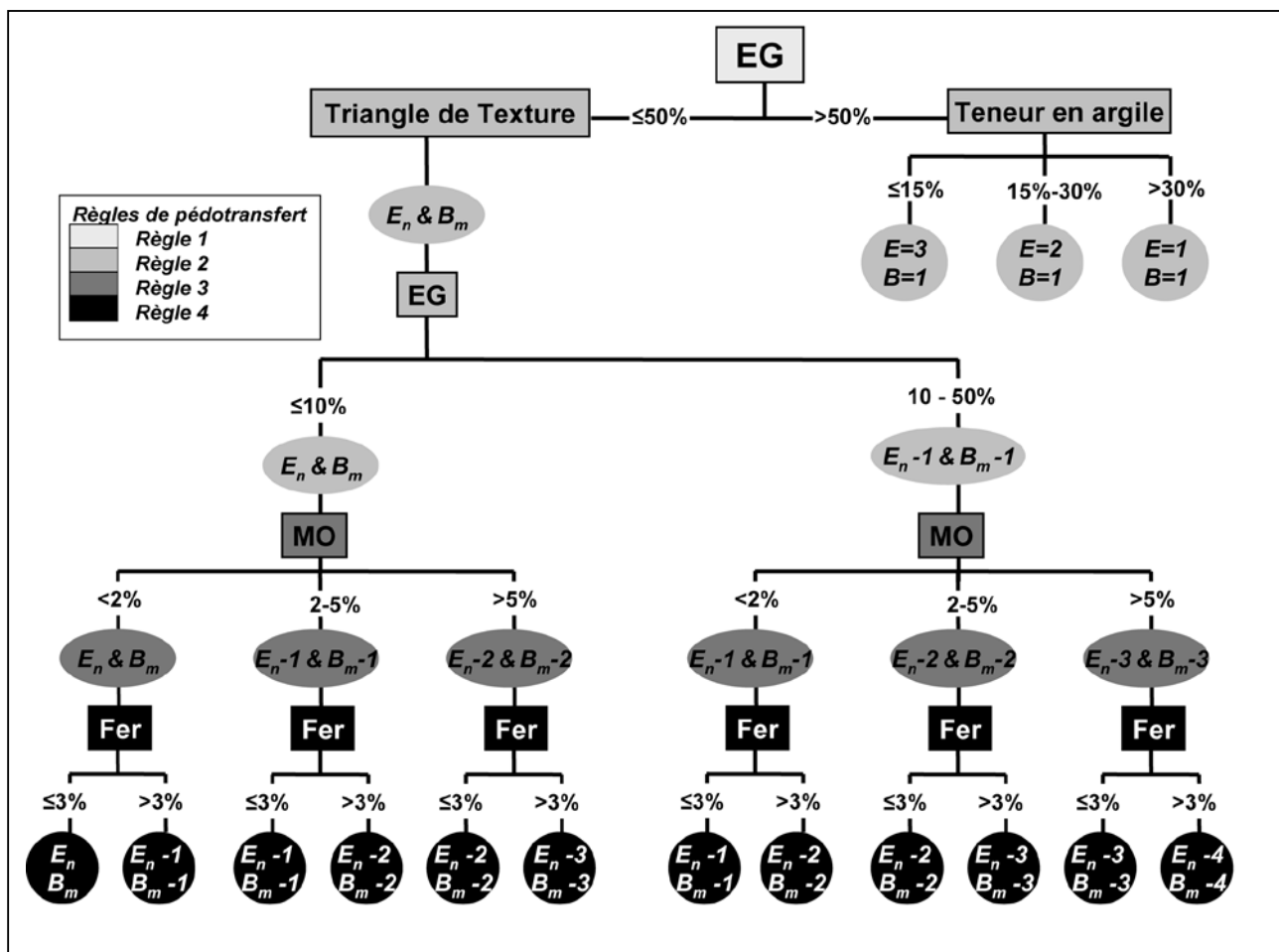
CARTOGRAPHIE DE L'ALEA ÉROSIF POUR LA RÉGION LANGUEDOC-ROUSSILLON

Aléa érosif annuel et saisonnier - information pixellaire

L'ensemble des couches d'information nécessaire à l'application du modèle se présente sous forme pixellisée (raster). La résolution de ces couches raster, dictée par celle du MNT utilisé, est de 250 m.

Figure 1 - Organigramme des règles de pédotransfert permettant d'obtenir les valeurs des classes de battance et d'érodibilité à partir de la combinaison des informations relatives à la teneur en éléments grossiers, à la texture, à la teneur en matière organique et en fer. EG = abondance des éléments grossiers en %, E_n = classe de sensibilité à l'érosion issue du triangle d'érodibilité, B_m = classe de sensibilité à l'érosion issue du triangle de battance, MO = abondance de la matière organique en %.

Figure 1 - Complete flow diagram of the rules of pedotransfer allowing to obtain the values of crusting and erodibility classes obtained starting from the combination of the coarse element content, the texture, the organic matter and iron content. EG = coarse element content in %, E_n = sensitivity class to soil erodibility resulting from the erodibility triangle, B_m = sensitivity to soil crusting resulting from the crusting triangle, MO = organic matter rate in %.



Chaque pixel fournit ainsi les paramètres nécessaires au modèle d'aléa qui produit donc un résultat par pixel.

L'histogramme de la *figure 2a* et les cartes de la *planche 3* représentent la répartition des différentes classes d'aléa érosif par pixel pour la région du Languedoc-Roussillon. La majorité de la superficie de la région est classée en aléa très faible (classe d'aléa 1), avec un minimum de 62,4 % en automne et un maximum de 81,9 % en été pour une valeur annuelle de 71,9 %. L'aléa faible (classe d'aléa 2) représente 13,6 % de la surface en valeur annuelle, variant entre 7,5 % au printemps et 21,3 % en automne. Les aléas moyens à très fort (classes d'aléa 3 à 5) représentent respectivement 5,4 %, 1,7 % et 0,3 % en valeur annuelle.

La visualisation concomitante des cartes saisonnières (*planches 3b, 3c, 3d, 3e*) et de la carte annuelle (*planche 3a*), met en évidence la variabilité interannuelle de l'aléa érosif sous climat méditerranéen. L'aléa est prégnant en automne (*planche 3d*) et un peu moins en hiver (*planche 3e*): ceci est à mettre en relation avec les fortes précipitations orageuses se produisant de l'automne au printemps mais surtout en septembre et en octobre. Ces épisodes sont particulièrement courants dans les départements de l'Hérault et du Gard: les normales de précipitations diffusées par Météo France pour la période 1971-2000 indiquent en effet un pic pluviométrique de 100 mm en octobre pour l'Hérault et de 135 mm pour le Gard (Météo France, 2006).

L'analyse de ces cartes met également en exergue quelques zones particulièrement sensibles à l'aléa érosif: sur la partie occidentale des contreforts pyrénéens, autour de Carcassonne et de Perpignan, tout le long de la côte méditerranéenne entre Narbonne et Nîmes et autour d'Alès. On peut par ailleurs noter que la modélisation de l'aléa érosif annuel a tendance à lisser l'aléa, ne faisant plus ressortir que les zones entourant Carcassonne, Montpellier et la zone entre Nîmes et Alès.

Aléa érosif annuel et saisonnier - intégration par bassins versants

Présentées ainsi, les cartes sont difficilement exploitables. Nous avons donc synthétisé l'aléa érosif annuel et saisonnier pour différents types d'Unités Spatiales d'Intégration (USI): unités spatiales de prises de décision administratives (cantons, communes) et unités spatiales fonctionnelles (petites régions agricoles, bassins versants RNDE - Réseau National des Données sur l'Eau). Les règles d'intégration de l'information pixelaire par USI qui ont été développées, prennent en compte les pourcentages de surface de chaque classe d'aléa contenue dans chaque USI (Le Bissonnais *et al.*, 2004). L'aléa intégré par USI sera par exemple très fort lorsque l'aléa est très fort pour plus de 31 % des pixels, ou lorsque l'aléa est fort ou très fort pour plus de 43 % des pixels, ou lorsque l'aléa est moyen à très fort pour plus de 62 % des pixels (Le Bissonnais *et al.*, 2004). Seules les cartes résultant de l'intégration par bassins versants RNDE, sont présentées ici (*planche 4*). Sur 306 bassins versants, 90,8 % sont affectés d'un aléa très faible à

faible (*figure 2b*). Seuls 1,3 % d'entre eux sont affectés d'un aléa fort à très fort.

L'analyse simultanée des cartes d'aléa érosif (*planche 4*) et des cartes sources entrées dans le modèle (*planche 5*), permet de distinguer quelques zones et d'apporter une ébauche d'explication:

- la zone située au sud-ouest de Carcassonne où l'aléa érosif fort est à mettre en relation avec la présence de vignobles particulièrement sensibles à l'érodibilité et une agressivité des pluies forte,
- la zone située au nord-ouest de Carcassonne où l'aléa est moyen à très fort: ici il s'agit de terres arables sur sols présentant une forte érodibilité,
- la Lozère où l'aléa est très faible à faible quelle que soit la saison considérée, en raison d'une battance faible et de la prédominance de forêts et de prairies peu sensibles à l'érosion,
- la zone entre Nîmes et Alès où l'aléa est moyen à fort: les cultures permanentes, la battance, l'érodibilité et l'agressivité de la pluie fortes en sont l'origine,
- deux bassins versants sur les contreforts pyrénéens montrent un aléa fort à très fort en automne: les pentes fortes, des sols érodibles et une agressivité des pluies fortes peuvent expliquer un tel aléa même si l'occupation des sols est caractérisée en majorité par des zones forestières peu sensibles à l'érosion,
- la plaine littorale enfin, montre quelques bassins versants pour lesquels l'aléa érosif est moyen en automne, mais faible pour les autres saisons: malgré une battance et une érodibilité des sols fortes et une occupation du sol caractérisée par des vignobles particulièrement sensibles à l'érosion, l'aléa faible est à mettre ici en relation avec une agressivité des pluies faible à moyenne.

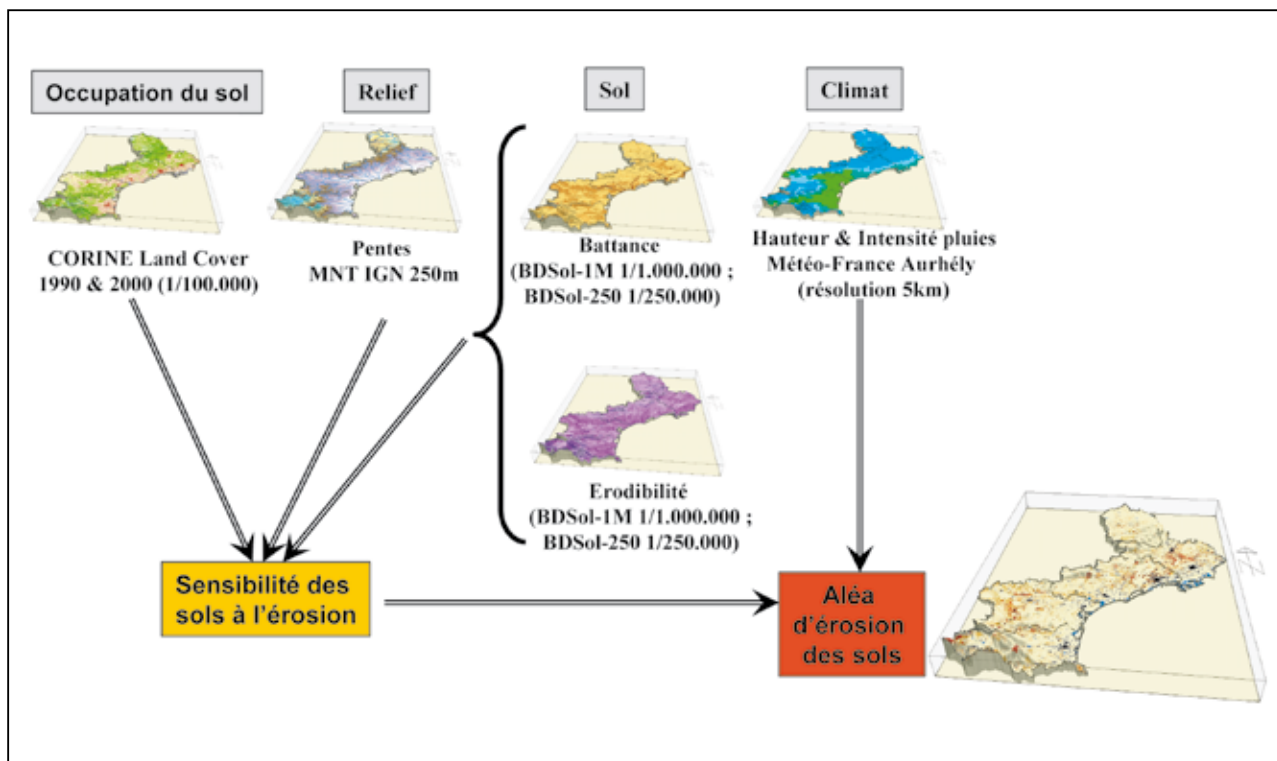
CONFRONTATION SPATIALE DES ZONES D'ALEA EROSIF FORT AUX ZONES D'ENJEUX

La connaissance de l'aléa - processus physique - ne suffit pas à une bonne gestion du risque - capacité des sociétés à faire face à un processus physique (Veyret et Reghezza, 2005). La notion d'aléa doit donc être complétée par la vulnérabilité des enjeux, qui définit « l'endommagement potentiel des éléments exposés à un aléa ». Historiquement la prise en compte de la vulnérabilité des enjeux se fait tardivement en France, à partir des années 1980, pour finalement se traduire par des zonages cartographiques qui doivent intégrer « une réflexion sur les formes d'organisation spatiales du territoire » (Veyret et Reghezza, 2005).

La vulnérabilité des enjeux restant difficile, voire impossible à évaluer à ces échelles de travail, nous nous attacherons à étudier les enjeux susceptibles d'être affectés par l'aléa érosif modélisé précédemment et à confronter les deux types de zonage. Les conséquences de ce phénomène naturel peuvent être appréhendées en analysant les enjeux susceptibles de subir des dommages en aval

Planche 1 - Présentation du modèle et des informations géographiques utilisées pour estimer et cartographier l'aléa érosif des sols en région Languedoc-Roussillon.

Plate 1 - Presentation of the model and the geographical informations used to estimate and map the soil erosion risk for the Languedoc-Roussillon region



des zones de départ. Les enjeux exposés à l'aléa érosif peuvent être humains, environnementaux ou matériels et économiques. Nous allons successivement développer ces trois axes en analysant les gènes occasionnées aux zones d'habitat, aux écosystèmes hydriques et enfin aux zones de productions viticoles.

L'enjeu urbain : coulées boueuses et urbanisation

La région Languedoc-Roussillon compte 2,46 millions d'habitants, pour 27 376 km², ce qui représente une densité de 90 hab.km². La population est très inégalement répartie sur le territoire : elle se concentre préférentiellement dans la zone littorale entre Narbonne et Nîmes avec une densité de près de 220 hab.km², tandis que la Lozère, département montagneux, est le département français le moins peuplé avec seulement 14 hab.km² (Ifen, 2003).

La croissance démographique en Languedoc-Roussillon est deux fois plus élevée que la moyenne française, soit environ 1,1 % par an depuis 1962 (PASER, 2004) et la plus importante en France métropolitaine. Ceci résulte du solde migratoire excédentaire généré par l'attrait du « Mezzogiorno » français. Ainsi, la population a-t-elle augmenté de 8,5 % de 1990 à 1999, soit plus du

double de la moyenne nationale s'élevant à 3,6 % pour la même période (INSEE, 2005). Une étude de projection de la population à l'horizon 2030 réalisée par l'INSEE (INSEE modèle OMPHALE 2000, 2005) fait état d'une augmentation possible de 31 % de la population d'ici 2030. Cette croissance démographique induit une occupation croissante de l'espace : développement des zones d'habitation, des zones d'activités économiques, des infrastructures. Les surfaces bâties et les surfaces destinées aux infrastructures de communication ont ainsi augmenté de 18 % au cours de ces 10 dernières années, contribuant à accroître l'artificialisation du territoire qui atteint 6,5 % de la superficie régionale (Ifen, 2003). Cet étalement urbain s'effectue principalement au détriment des surfaces agricoles. La pression urbaine sur les sols agricoles est directement perceptible dans les paysages par la constitution d'un mitage en zone péri-urbaine.

Deux types d'approches sont développés dans cette étude pour évaluer l'enjeu urbain. Dans un premier temps, les coulées boueuses, manifestations de l'aléa érosif en aval des zones de départ, sont confrontées aux zones d'aléa. Dans un deuxième temps, elles sont confrontées aux zones dans lesquelles l'enjeu urbain est fort.

Planche 2 - Règle 2 : règle de pédotransfert établie pour la région Languedoc-Roussillon permettant de convertir les données texturales des strates en classes de battance et d'érodibilité par projection dans les triangles de texture redécoupés en 5 classes de sensibilité : 1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyenne, 4 = forte, 5 = très forte.

Plate 2 - Rule 2: pedotransfer rule specific to the Languedoc-Roussillon region allowing the conversion of strata textural data to crusting and erodibility classes through projection into texture triangles split into 5 sensitivity classes:

1 = very low, 2 = low, 3 = medium, 4 = high, 5 = very high.

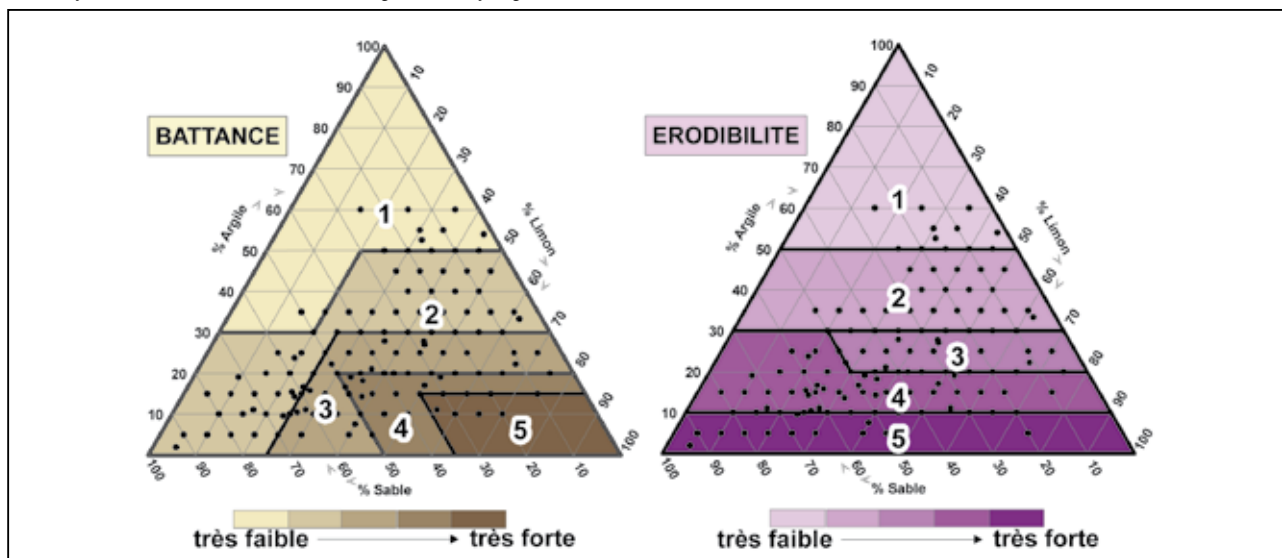


Figure 2 - Histogramme des fréquences de chaque classe d'aléa érosif annuel et saisonnier : aléa par pixel (a), aléa intégré par bassin versant RNDE (b). Les saisons : printemps (mars à mai), été (juin à août), automne (septembre à novembre), hiver (décembre à février).

Figure 2 - Histogram of annual and seasonal erosion risk frequency: risk (a), risk integrated by RNDE water catchment (b). The seasons: spring (from March to May), summer (from June to August), autumn (from September to November), winter (from December to February).

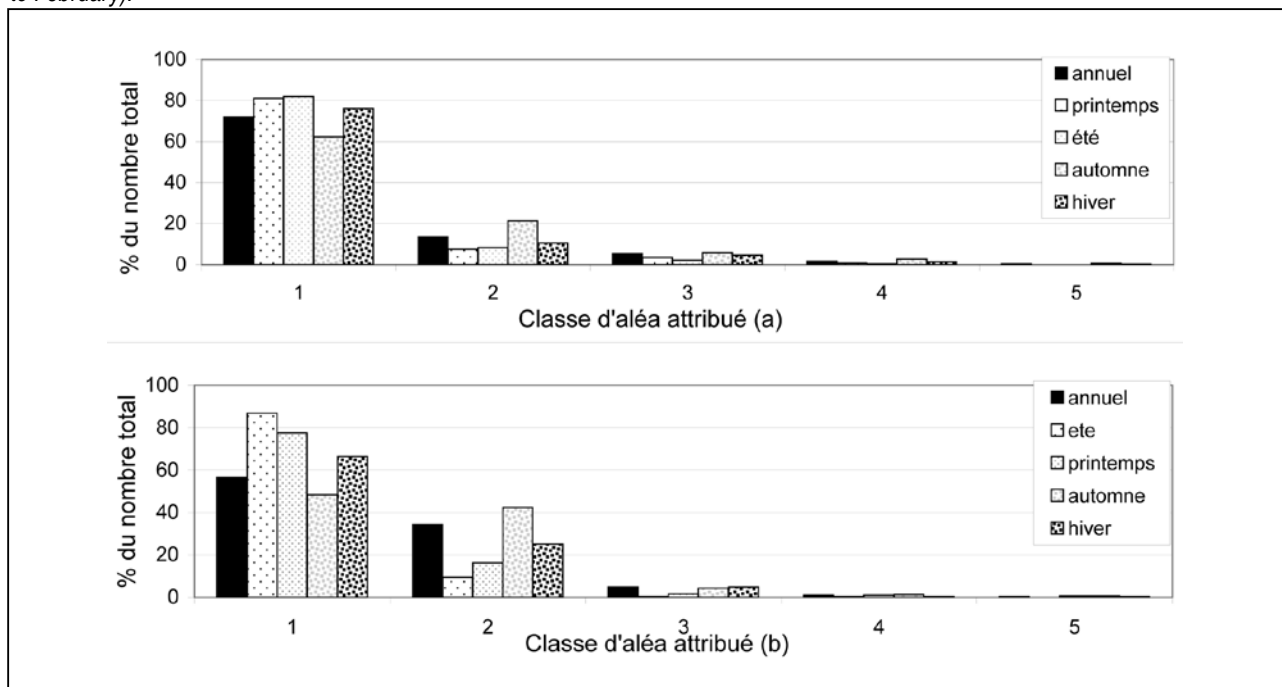


Planche 3 - Cartes résultant de la modélisation de l'aléa érosif à 1/250 000^e : annuel (a), printemps (b), été (c), automne (d), hiver (e). Les données sont présentées par pixel de 250 x 250 m.

Plate 3 - Maps resulting from the modelling of the soil erosion risk on a 1:250,000 scale: annual (a), spring (b), summer (c), autumn (d), winter (e). Data are integrated by 250 x 250m cells.

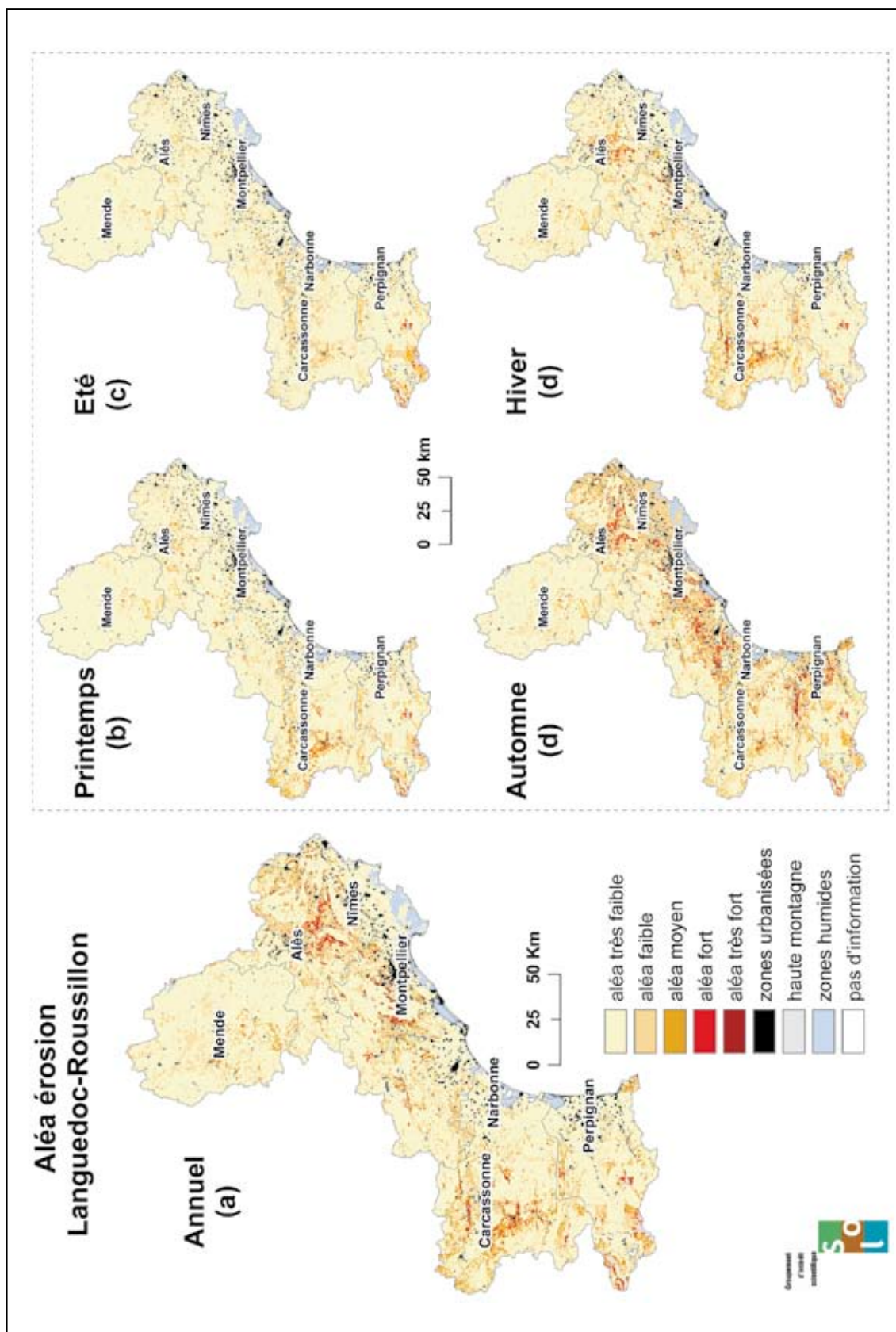


Planche 4 - Cartes résultant de la modélisation de l'aléa érosif à 1/250 000^e : annuel (a), printemps (b), été (c), automne (d), hiver (e). Les données ont été intégrées par USI (Unités Spatiales d'Intégration), en l'occurrence par bassins versants RNDE (Réseau National des Données sur l'Eau).

Plate 4 - Maps resulting from the modelling of the soil erosion risk on a 1/250,000 scale: annual (a), spring (b), summer (c), autumn (d), winter (e). Data are integrated by SIU (Spatial Integration Unit), the RNDE (Water Data National Network) watersheds

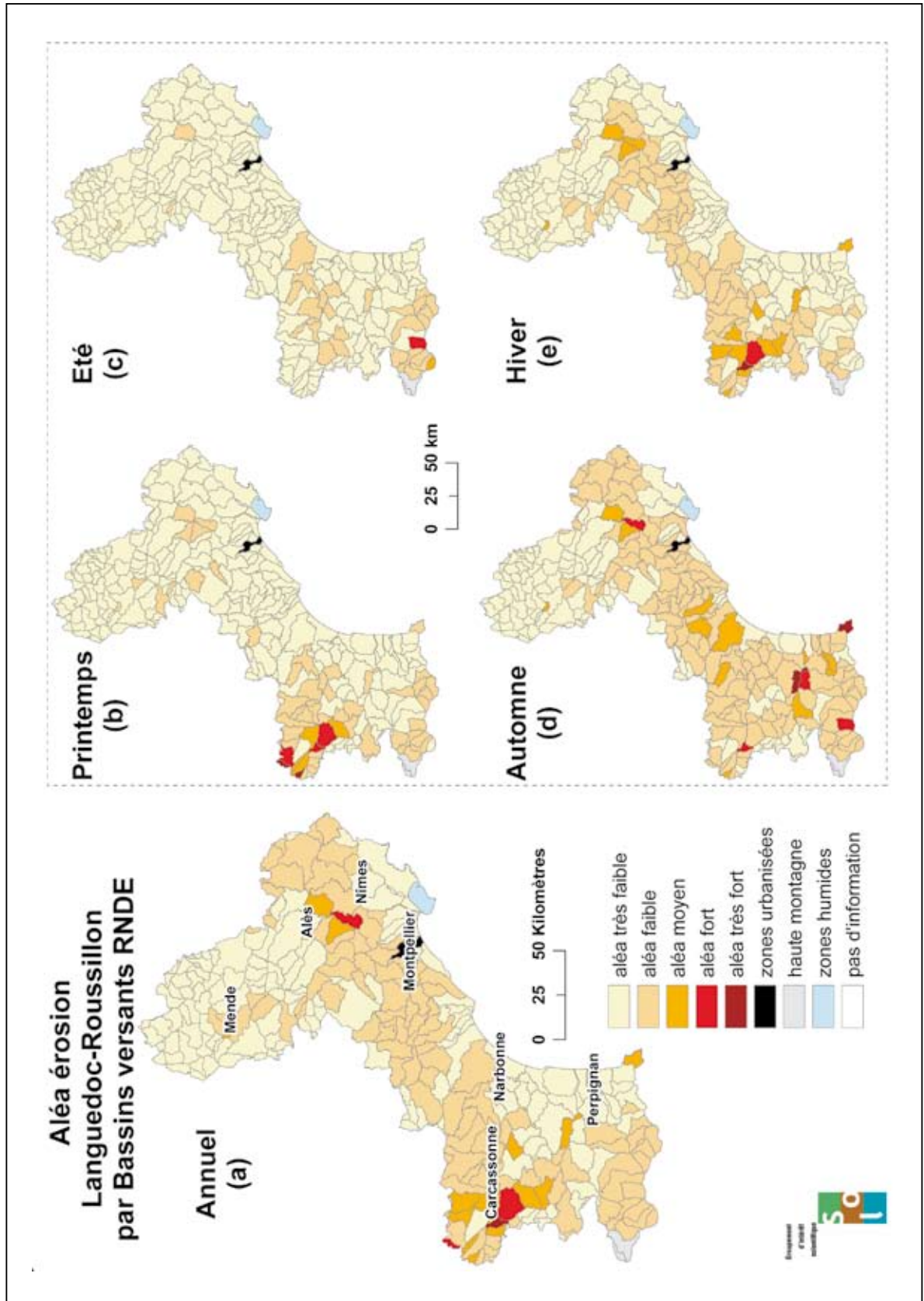


Planche 5 - Cartes sources entrées dans le modèle d'estimation de l'aléa érosif pour la région Languedoc-Roussillon : occupation du sol (a), battance (b), pentes (c), érodibilité (d) et agressivité des pluies (e).

Plate 5 - Original Maps integrated in the risk erosion assessment model for the Languedoc-Roussillon area: land use (a), crusting (b), slope (c), erodibility (d) and rainfall aggressivity (e).

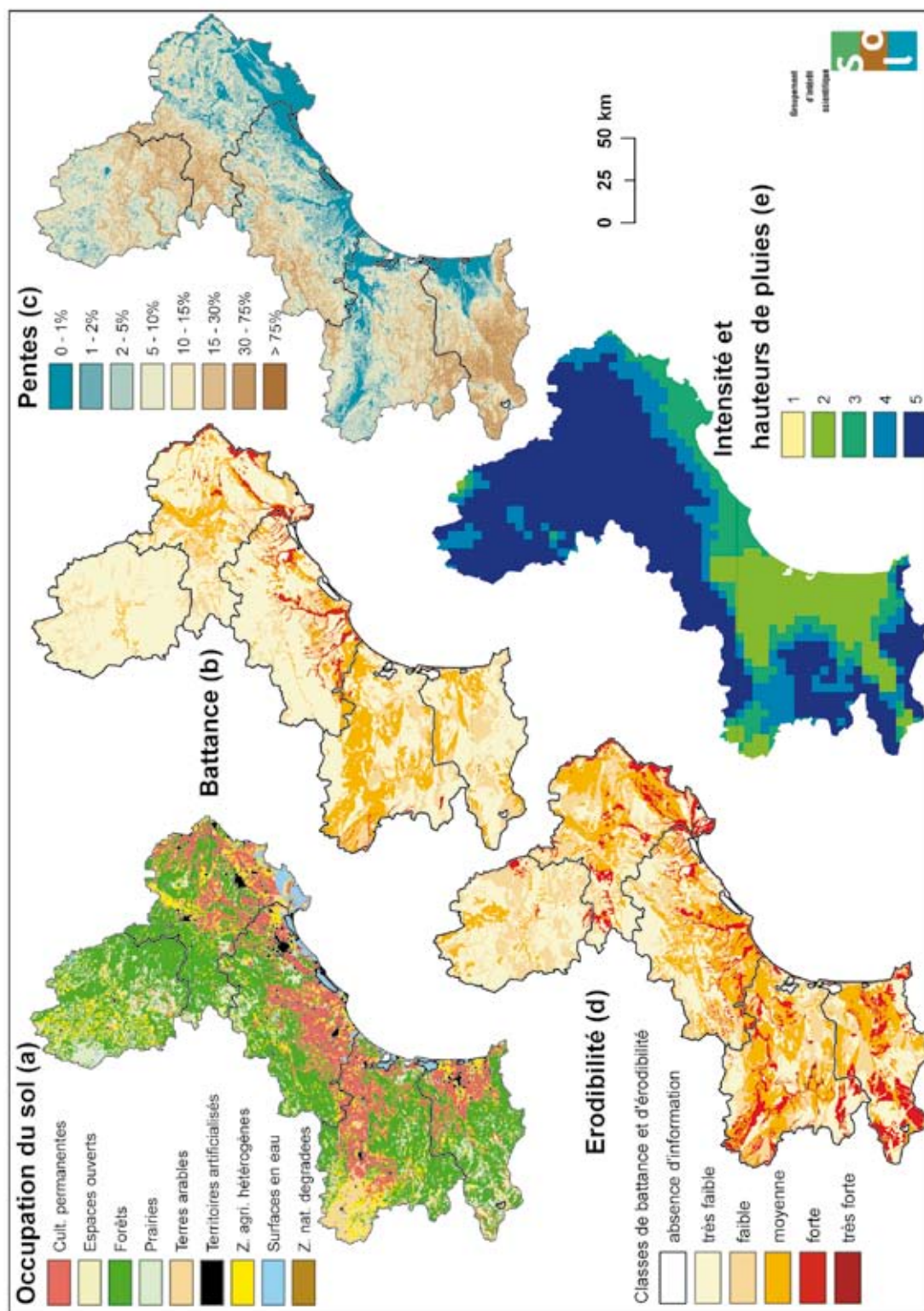


Plate 7 - Seasonal mapping presenting the suspended matter classes for the 5511 points taken between 1990 and 2000 within the framework of the RNB (RMC Water Agency) and the erosion risk integrated by watershed computed upstream from each of these points.



Planche 8 - Carte des zones d'aptitude viticoles AOC (a) et carte de l'aléa érosif dans ces zones (b)..
Plate 8- Map of the AOC wine aptitude (a) and map of soil erosion risk in these zones (b).

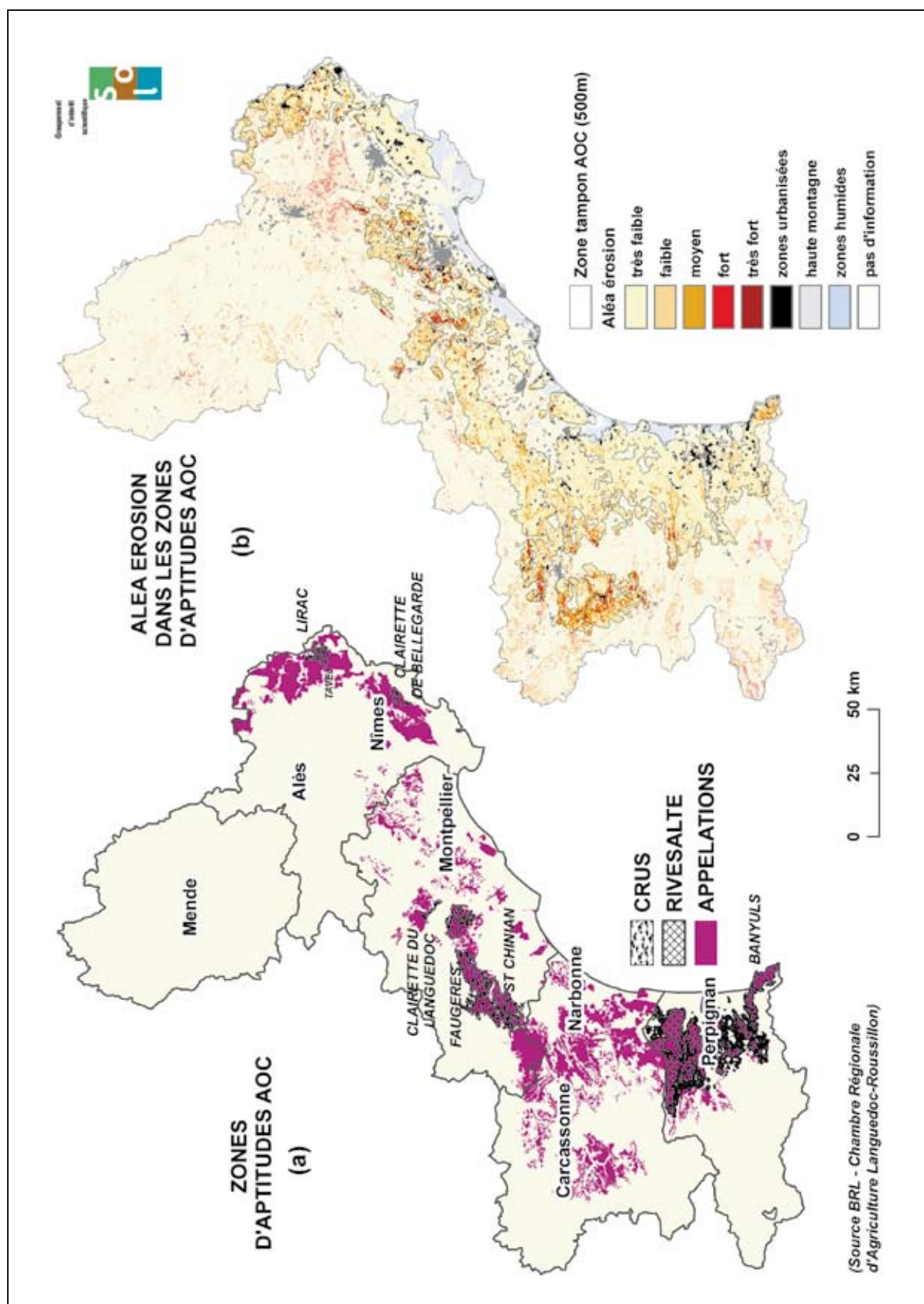
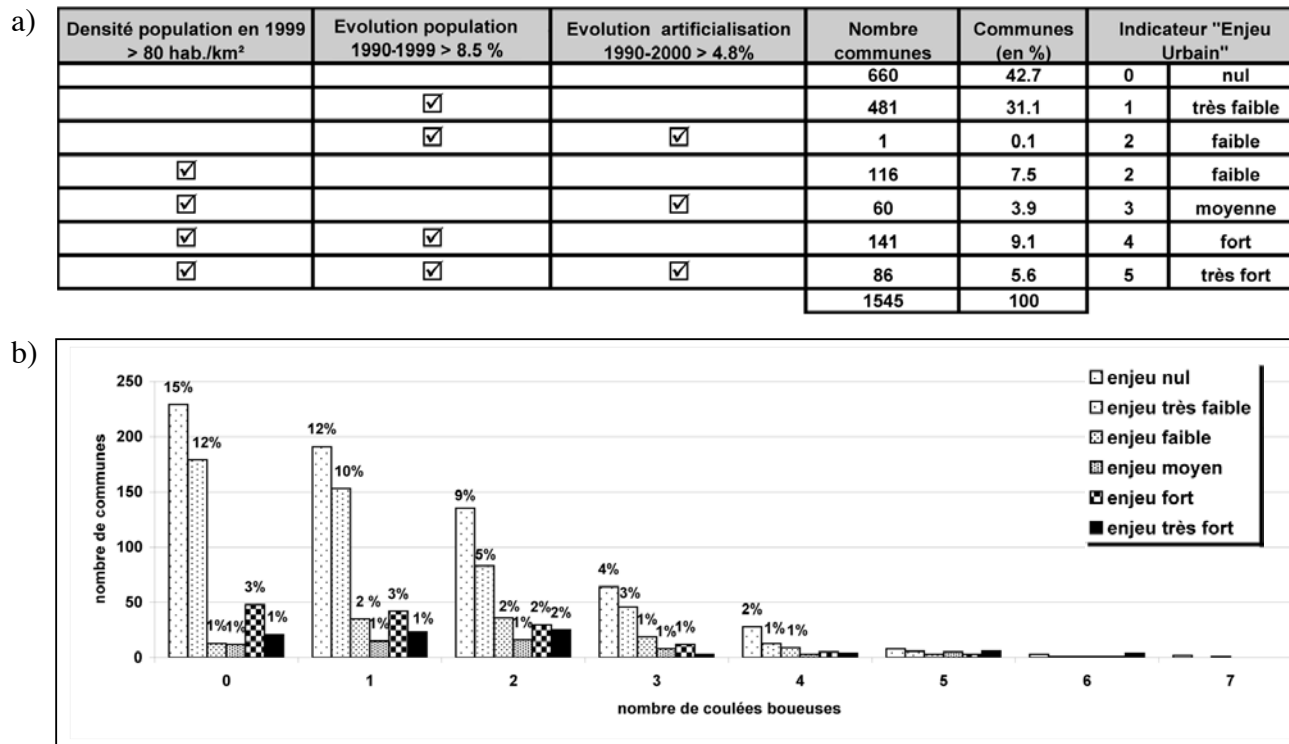


Figure 3 - Tableau de définition de l'indicateur « enjeu urbain » (a) et histogramme de sa distribution en fonction du nombre de coulées boueuses pour les 1545 communes de la région Languedoc-Roussillon (b).

Figure 3 - Table defining the « urban stake » indicator (a) and histogram of its distribution according to the number of mudflows for each of the 1545 municipalities of the Languedoc-Roussillon region (b).



Indicateur « coulées boueuses »

Pour spatialiser et quantifier les conséquences de l'érosion en France, on peut s'appuyer sur le recensement des coulées boueuses, dont la fréquence constitue un bon indicateur d'une érosion chronique importante (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Le fichier de coulées boueuses utilisé ici, s'appuie sur deux sources de données différentes. De 1985 à 1995, les données proviennent de la base de données des dossiers « cat.nat » recensant les coulées boueuses déclarées à l'occasion des demandes d'indemnisation au titre de catastrophe naturelle. Pour la période 1995 à 2000, elles sont extraites de la base CORINTE (COmmunes à Risques Naturels et technologiques), qui regroupe les communes dont l'état de catastrophe naturelle a été reconnu et publié au journal officiel.

La région Languedoc-Roussillon a déclaré le plus grand nombre de coulées boueuses sur la période 1995-2000, avec 2055 dossiers de demande d'indemnisation. Elle se classe au 3^e rang des régions françaises pour la densité de coulées boueuses, avec plus de 7 coulées pour 100 km² (Le Bissonnais *et al.*, 2002).

La carte de répartition des coulées boueuses (*planche 6a*) dévoile une distribution hétérogène sur le territoire régional. La majorité des coulées boueuses sont localisées sur les départements de l'Aude (730 coulées boueuses) et de l'Hérault (569 coulées

boueuses), soit 63 % du total. La Lozère recense peu de coulées boueuses avec seulement 80 déclarations, soit 3,9 % du total régional. Dans ce département moins peuplé que les autres, les coulées boueuses engendrent potentiellement moins de dégâts matériels ou humains et ne font donc pas forcément l'objet d'une déclaration de catastrophe naturelle.

Les communes ayant déclaré des coulées boueuses se situent plutôt en aval des zones d'aléa érosif fort et sont distribuées préférentiellement le long des cours d'eau (*planche 6a*). En effet, 646 communes ayant déclaré au moins une coulée boueuse, intersectent le réseau hydrographique. Elles représentent 1336 coulées boueuses, soit 65 % des coulées recensées entre 1985 et 2000 et couvrent 12960 km², soit 62 % de la superficie totale de la région Languedoc-Roussillon. De plus, 287 communes localisées dans une zone tampon de 3 km de part et d'autre du réseau hydrographique (BD Carthage), totalisent 403 coulées boueuses, soit 19 % des coulées déclarées entre 1985 et 2000. Ces communes couvrent 2416 km², soit 8,8 % de la superficie totale de la région Languedoc-Roussillon.

Les coulées boueuses sont très concentrées dans la zone située entre Béziers, Carcassonne et Perpignan. Ainsi les communes situées aux alentours de Narbonne ont recensé jusqu'à 7 coulées

sur leur territoire. Elles se situent à la confluence entre l'Aude, l'Orbieu et la Cesse. De même, la zone située entre le Gard et le Vidourle (entre Nîmes et Alès) et celle située en amont de la confluence entre la Peyne et l'Hérault, recensent un grand nombre de coulées boueuses et présentent un aléa érosif fort. Le réseau hydrographique situé en aval de ces zones d'aléa fort et très fort, intersecte 248 communes (soit 16 % des communes) recensant au minimum une coulée boueuse et couvrant 4 460 km² (également 16 % de la superficie totale de la région).

La confrontation cartographique entre les coulées boueuses, l'aléa érosif et le réseau hydrographique, a donc montré que les coulées boueuses se distribuent préférentiellement en aval des zones d'aléa érosif fort, le long des cours d'eau et sont particulièrement concentrées en amont de la confluence de certains cours d'eau.

Indicateur « enjeu urbain » proposé

Un indicateur « enjeu urbain » est établi pour rendre compte du phénomène d'urbanisation par lequel l'habitat affecte les territoires attractifs. L'urbanisation est ici définie par « les territoires artificialisés » de la nomenclature Corine Land Cover, à laquelle on ajoute l'aspect dynamique en tenant compte des évolutions. Cette méthode nous semble préférable à l'utilisation de seuils de densité combinés avec des critères d'accessibilité, principalement pour deux raisons :

- les seuils de densité non modulés par les aspects évolutifs mettraient en exergue les centres urbains, alors que ceux-ci sont théoriquement les derniers touchés, les coulées boueuses devant préalablement traverser les zones péri-urbaines,
- les informations nécessaires à la définition de critères d'accessibilité sont difficilement modélisables.

Etablissement de l'indicateur

Cet indicateur est construit à partir des données suivantes : la densité de population en 1999 (sources : INSEE), l'évolution de la population entre 1990 et 1999 (sources : INSEE), et l'évolution de l'artificialisation du territoire entre 1990 et 2000 (sources : Corine Land Cover 1990 et 2000).

La densité de population est le critère le plus important dans la définition de l'indicateur d'enjeu urbain. En effet, les populations sont d'autant plus vulnérables qu'elles sont concentrées dans des zones particulièrement urbanisées, peu propices à des évacuations d'urgence. L'échelle de gravité des dommages produite par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, classe les événements naturels en six classes basées sur les dommages humains. Elles s'échelonnent de l'incident (aucun blessé) jusqu'à la catastrophe majeure (1 000 morts ou plus).

L'évolution démographique permet quant à elle de prendre en compte la dynamique des territoires : les zones en mutation sur un pas de temps de 10 ans peuvent ainsi être mises en exergue.

L'artificialisation des territoires concerne tout d'abord les zones urbanisées, industrielles ou commerciales, ensuite les réseaux de communication, les mines, décharges et chantiers et les espaces verts artificialisés. L'évolution de l'artificialisation permet ainsi d'aborder les enjeux économiques par la prise en compte des dégâts matériels pouvant affecter les zones d'habitat.

L'indicateur « enjeu urbain » est défini de la manière suivante : $ENJEU\ URBAIN = f [(densité\ de\ population\ 1999), (évolution\ de\ la\ population\ 1990-1999), (évolution\ de\ l'artificialisation\ 1990-2000)]$

Les 3 facteurs sont comparés aux seuils de 80 hab.km², 8,5 % et 4,8 %, correspondant respectivement à la densité de population moyenne de la région Languedoc-Roussillon en 2000, à l'évolution démographique moyenne de la région Languedoc-Roussillon, et à l'évolution de l'artificialisation moyenne nationale pour la période 1990-2000 (Ifen, 2005). La comparaison pour chacune des 1 545 communes du Languedoc-Roussillon des valeurs réelles obtenues pour les 3 facteurs de l'indicateur d'enjeu urbain aux seuils choisis, permet d'identifier les communes pour lesquelles l'évolution de l'artificialisation est la plus forte.

La figure 3a liste les différentes combinaisons obtenues pour chacun des trois paramètres définissant l'indicateur, et expose comment elles ont été agrégées pour obtenir un indicateur d'enjeu urbain en 5 classes, s'échelonnant de « enjeu nul » à « enjeu très fort ».

Interprétation des résultats

La spatialisation de cet indicateur (figure 3b) montre que l'enjeu urbain est très fort en zone littorale, alors que pour 42,7 % des communes l'enjeu est nul et pour 31,2 % l'enjeu est très faible. Les grandes villes comme Nîmes, Montpellier et Perpignan, montrent un enjeu moyen. Narbonne, classée avec un enjeu faible fait exception malgré une densité de population de 265 hab.km². Ceci est dû à une évolution de la population faible entre 1990 et 1999 n'atteignant que 1,4 % et un taux d'artificialisation de 2,6 %, également faible sur la même période. L'enjeu est fort pour 9,1 % des communes : celles-ci sont localisées principalement dans la couronne périurbaine entourant les grandes villes et avec une petite extension le long du littoral du Gard. Enfin, 5,6 % des communes présentent un enjeu très fort : elles sont circonscrites dans la zone périurbaine la plus proche des grandes villes avec une extension vers les communes littorales : ce phénomène est particulièrement visible pour Perpignan, Béziers et Montpellier. En-dehors des zones littorales, seules Carcassonne et Alès et leurs communes périurbaines sont affectées d'un enjeu moyen et fort.

La spatialisation de l'indicateur montre que l'enjeu est plus fort en zones périurbaines que dans les grandes villes *intra muros*. En effet, l'évolution démographique et l'artificialisation des grandes villes sont limitées et se font donc au profit des communes périurbaines qui réunissent les trois critères de définition de l'enjeu urbain (densité de la population, évolution de la population et artificialisation fortes).

Tableau-1 - Tableau d'analyse de variance : MES - saison (a), MES – aléa saisonnier (c) ; Comparaison multiple des moyennes (Newman-Keuls : Analyse des différences entre les groupes avec un intervalle de confiance à 95 %) : MES - saison (b), MES – aléa saisonnier (d).

Table 1 - Table of variance analysis : suspended matters – season (a), suspended matters – seasonal risk (c) ; Multiple comparisons of the averages (Newman-Keuls : differences Analysis between groups with a 95 % confidence level) : suspended matters – season (b), suspended matters – seasonal risk (d).

A

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F de Fisher	Pr > F
Modèle	3	58555.509	19518.503	5.069	0.002
Résidus	4960	19098828.659	3850.570		
Total	4963	0.000			

B

Modalités	Moyenne	Regroupements
Été	12.757	A
Printemps	14.294	A B
Hiver	19.359	B C
Automne	20.733	C

C

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F de Fisher	Pr > F
Modèle	4	91019.617	22754.904	5.918	< 0.0001
Résidus	4959	19066364.551	3844.800		
Total	4963	0.000			

D

Modalités	Moyenne	Regroupements
Aléa faible	10.547	A
Aléa très fort	17.058	A B
Aléa très faible	18.737	B
Aléa fort	19.135	B
Aléa moyen	22.144	B

En confrontant le nombre de coulées boueuses par commune et le nombre de communes affectées au sein de chaque classe d'enjeu, on montre que la proportion de communes ayant déclaré des coulées boueuses décroît au fur et à mesure que le nombre de coulées boueuses par commune augmente (*figure 3b*). Seules les communes présentant un enjeu faible, montrent une distribution de type normale. Si 32,5 % des communes n'ont pas recensé de coulées boueuses, 60,6 % des communes ont déclaré entre 1 et 3 coulées boueuses et 6,9 % plus de 3 coulées boueuses. Dans

l'ensemble ce sont les communes non ou faiblement sensibles qui sont majoritairement affectées par des coulées boueuses, soit 47,5 % des communes. Cela peut signifier que d'autres enjeux interviennent dans le renforcement du nombre de coulées boueuses : urbanisation diffuse, enjeux agricoles... Seules 10 % des communes ayant subi des coulées boueuses montrent un enjeu urbain fort ou très fort, comme par exemple pour la zone au nord de Narbonne, rassemblant 6 communes classées en enjeu fort ou très fort et recensant 33 coulées boueuses. Cette zone correspond

par ailleurs à la zone de confluence entre les cours d'eau de l'Aude, de l'Orbieu et de la Cesse.

La comparaison des cartes de localisation des coulées boueuses et de la spatialisation de l'indicateur d'enjeu urbain enfin, montre que les coulées boueuses sont moins nombreuses sur le littoral qui concentre les zones d'enjeu fort.

L'enjeu « qualité de l'eau » : Matières En Suspension (MES) dans les eaux de surface

Le maintien de la qualité des eaux souterraines et superficielles est un enjeu majeur pour la région Languedoc-Roussillon, en raison d'une pression agricole et urbanistique croissante. Ainsi, les prélèvements d'eau à usage agricole et domestique représentent chacun un tiers des prélèvements en Languedoc-Roussillon ; 85 % des prélèvements d'eau à usage domestique proviennent des ressources souterraines et 96 % des prélèvements à usage agricole des ressources superficielles (Ifen, 2003).

Les particules entraînées par l'érosion hydrique peuvent potentiellement contaminer le réseau hydrographique et les eaux de surface. Cette hypothèse peut être étayée par différents types de mesures : la turbidité, les Matières En Suspension (MES), le Carbone Organique Total (COT), le taux de pesticides, le taux de phosphore etc. Les MES sont caractérisées par de fines particules minérales ou organiques en suspension dans l'eau. Elles sont d'origine naturelle, entraînées par les précipitations et l'érosion hydrique, ou apportées par les rejets urbains et industriels. Les MES sont à l'origine de l'eutrophisation des cours d'eau et occasionnent une gêne pour les écosystèmes aquatiques. Dans cette étude, les mesures de MES sont confrontées à l'aléa érosif, pour estimer si l'eau représente un enjeu important vis-à-vis de l'érosion hydrique des sols en Languedoc-Roussillon.

Indicateur de qualité des eaux de surface

Nous disposons d'un jeu de données de 5511 mesures de MES prises sur 500 points de mesure dans la période 1990-2000. Ces données sont issues du Réseau National de Bassin (Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse) et ont pour vocation de vérifier la qualité des eaux de surface. Il faut souligner que les mesures ne sont pas effectuées de manière systématique aux mêmes dates chaque année et pour chacun des points de prélèvements, rendant une analyse diachronique impossible. De même le contexte hydrologique au moment du prélèvement n'est pas connu, limitant l'interprétation. Enfin, une partie de la Lozère n'est pas couverte par les campagnes de mesures de l'Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse et ne pourra donc être étudiée ici.

Les grilles d'interprétation du Système d'Evaluation de la Qualité de l'Eau SEQ - Eau (MEDD & Agences de l'eau, 2003), permettent de traduire les valeurs de MES en classes d'aptitude à la biologie pour les eaux de surface : qualité très bonne ($MES < 25 \text{ m.g.l}^{-1}$), bonne ($25 \leq MES < 50 \text{ m.g.l}^{-1}$), moyenne ($50 \leq MES < 100 \text{ m.g.l}^{-1}$),

médiocre ($100 \leq MES < 150 \text{ m.g.l}^{-1}$) et très mauvaise ($MES \geq 150 \text{ m.g.l}^{-1}$). La distribution de l'échantillon de données dont nous disposons s'effectue dans chacune de ces 5 classes respectivement : 87,4 % des prélèvements indiquent une qualité très bonne (dont 11,4 % < au seuil de détection de 4 m.g.l^{-1}), 7,5 % bonne, 3,1 % moyenne, 0,7 % médiocre et 1,3 % très mauvaise (dont 3 valeurs extrêmes s'échelonnant de 1400 à 2730 m.g.l^{-1}).

Pour analyser l'évolution des MES par saison, nous avons scindé l'échantillon de 5511 prélèvements en 4 sous échantillons saisonniers en se basant sur les mêmes découpages que ceux utilisés dans la modélisation de l'aléa érosif : le printemps de mars à mai, l'été de juin à août, l'automne de septembre à novembre et l'hiver de décembre à février. Les 4 sous échantillons représentent respectivement 29 %, 29,6 %, 13,1 % et 28,3 %.

Pour analyser l'influence de l'aléa érosif sur la qualité des eaux de surface, l'aléa érosif saisonnier est croisé avec l'aire drainée en amont de chaque point prélevé. Les points de prélèvement sont préalablement recalés sur le réseau hydrographique estimé à partir du MNT IGN 250 m, avant de délimiter les aires drainées en amont. Les classes d'aléa érosif sont intégrées spatialement par aire drainée en fonction du pourcentage de surface de l'aire drainée affecté par chacune des classes (Le Bissonnais *et al.*, 2002). *In fine*, à chaque point de mesure correspond une valeur de MES et une classe d'aléa érosif pour chaque saison (printemps, été, automne, hiver). Cependant, sur les 5511 points de prélèvements que comporte l'échantillon, seules 4964 valeurs de MES sont exploitées : 547 bassins versants sont en effet classés en zones humides, zones de montagne ou zones urbanisées et ne sont donc pas affectés d'une classe d'aléa érosif.

Interprétation des résultats

Les cartes localisant les classes de qualité MES (*planche 7*) montrent en premier lieu que certains secteurs présentent systématiquement des valeurs de MES élevées quelle que soit la saison : la zone amont de l'Aude aux environs de Carcassonne, la zone aval de l'Aude et sur le Canal de la Robine aux alentours de Narbonne. D'autres secteurs montrent par contre une forte composante saisonnière :

- des valeurs de MES supérieures à 100 m.g.l^{-1} ont été mesurées en aval du Tech en automne et au printemps,
- des valeurs de MES considérées très mauvaises ont été mesurées en aval du Rhône au printemps, en automne et en hiver,
- des valeurs de MES considérées médiocres ou très mauvaises ont été prélevées sur le Fresquel au printemps, en été et en automne, et sur l'Hérault en automne et en hiver,
- des valeurs de MES très mauvaises ont été mesurées sur la Tet au printemps et en hiver.

Enfin, la confrontation de l'altération de la qualité de l'eau par les MES et des zones d'aléa érosif fort montre une cohérence spatiale particulièrement en automne : les mesures de MES élevées en aval du Tech, du Rhône, de l'Orb et en amont de l'Aude peuvent être

prises en relation avec des bassins versants amont particulièrement sensibles à l'aléa érosif. Ceci se vérifie également pour la zone amont de l'Aude au printemps et en hiver. Le régime climatique méditerranéen en est sans doute la cause, avec des périodes de pluviométrie fortes principalement en automne et secondairement au printemps (Ifen, 2003).

Les analyses statistiques tendent à confirmer ces observations. Les analyses de variance (*tableau 1a et 1c*) montrent qu'il existe une différence significative entre les moyennes au risque d'erreur de 5 %. La comparaison multiple des moyennes (*tableau 1b*) montre qu'il existe une différence significative entre la moyenne des valeurs de MES en automne et la moyenne des valeurs de MES en été. Par contre au printemps et en hiver les moyennes des valeurs de MES prélevées ne sont pas significativement différentes de l'été d'une part et de l'automne d'autre part. Les moyennes des valeurs de MES prélevées au printemps et en hiver sont également différentes l'une de l'autre.

Enfin, la comparaison multiple des moyennes (*tableau 1d*) montre qu'il existe une différence significative au risque d'erreur de 5 %, entre la moyenne des valeurs de MES pour les classes d'aléa érosif faible d'une part et très faible, fort et moyen d'autre part. Par contre pour les bassins versants amont classés en aléa érosif très fort, la moyenne des MES n'est pas significativement différente des deux groupes cités ci-dessus. Le *tableau 1d* montre donc qu'il n'existe pas de relation entre les moyennes de MES et le classement des bassins versants selon l'aléa érosif.

Pour conclure quant à l'impact de l'érosion hydrique sur l'altération de la qualité des eaux de surface par les MES, il faudrait pouvoir discriminer les apports d'origine agricole des apports industriels ou de ceux imputables à des lâchers de barrage.

L'enjeu viticole

Le vignoble présente un enjeu agricole et économique important pour la région Languedoc-Roussillon. Avec ses 300 000 hectares et ses 8 AOC (Appellations d'Origines Contrôlées), il s'agit du plus grand vignoble de France, représentant un tiers de la superficie viticole nationale et 30,3 % de la SAU de la région Languedoc-Roussillon en 2000 (Ifen, 2003).

Les dégâts occasionnés dans les vignobles sont essentiellement de trois types : l'arrachement des plants de vignes, la création de rigoles et ravines gênant les interventions culturales et le recouvrement des plants par le dépôt des particules entraînées par l'érosion. Même si la plaine de l'Hérault est peu sensible à l'érosion car les pentes sont faibles, l'alternance de périodes très sèches et de fortes pluies peut générer des signes érosifs localement sur certaines parcelles (Le Bissonnais *et al.*, 2002). La redistribution des particules entraînées vers le bas des parcelles pose également le problème des contaminations par les fertilisants et éléments polluants adsorbés sur ces particules. La concentration des éléments polluants vers le bas des parcelles peut donc entraîner des phénomènes locaux de phytotoxicité.

La confrontation des zonages d'aptitude AOC (*planche 8a*) et de l'aléa érosif (*planche 8b*), montre que :

- les vignobles soumis à un aléa érosif fort sont principalement : les appellations Malepère et Limoux au sud de Carcassonne, l'appellation Cabardès au nord de Carcassonne, les Coteaux du Languedoc autour de Montpellier, l'appellation Collioure (cru Banyuls) au sud de Perpignan, la zone nord-ouest de l'appellation Roussillon-Village au nord de Perpignan et les Côtes du Rhône ;
- les vignobles soumis à un aléa érosif moyen sont les crus St Chinian et Faugères à l'ouest de Montpellier et les Côtes du Roussillon au sud de Perpignan ;
- les vignobles soumis à un aléa érosif faible sont les appellations Corbières près de Narbonne, l'appellation Costières de Nîmes et les appellations Coteaux du Languedoc présentes dans les plaines littorales.

Des vérifications terrain, complétées par l'étude de photos aériennes permettraient de valider ces observations. Enfin, pour estimer la vulnérabilité des vignobles, il faudrait concevoir un indicateur qui pourrait combiner l'évolution des superficies et la dégradation des sols viticoles. La déprise agricole impacte en effet fortement le territoire viticole : plus de 50 000 ha de vignes ont été arrachés durant les trente dernières années et demeurent en friches (Ifen, 2003). La dégradation biologique des sols (disparition des micro-organismes et de la faune du sol) induite par l'emploi d'engrais chimiques et de pesticides favoriserait quant à elle un dépérissement des vignobles, notamment dans le département de l'Hérault, où un tiers du vignoble serait concerné (Ifen, 2003).

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Modélisation de l'aléa érosif

Différents types d'investigations sont envisageables pour valider la cartographie de l'aléa érosif modélisé à l'échelle de la région Languedoc-Roussillon à partir des données issues du Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000.

La comparaison avec la cartographie obtenue à partir de la BDSol-1M réalisée précédemment (Le Bissonnais *et al.*, 2002) a d'ores et déjà permis de vérifier que les zones des différentes classes d'aléa érosif sont globalement géographiquement bien positionnées. Si la comparaison pixel à pixel des classes d'aléa montre que 75 % des pixels sont affectés de la même classe, on note cependant que l'aléa a tendance à être plus faible lorsqu'il est modélisé à l'aide de BDSol-250. On peut cependant raisonnablement concevoir que les données tant au niveau géographique que sémantique sont plus précises dans la BDSol-250. Une investigation plus fine devrait permettre de quantifier l'apport des précisions pédologique sémantique et géographique de BDSol-250 par rapport à BDSol-1M. Les paramètres de battance et d'érodibilité estimés

par règles de pédotransfert à partir de la BDSol-1M d'une part et de la BDSol-250 d'autre part, devront également être comparés. Enfin, le poids des précisions géographiques et sémantiques pourra être analysé selon différentes combinaisons. Le poids des règles de pédotransfert pourra être étudié en appliquant les règles établies pour la BDSol-1M à la BDSol-250. A l'inverse, les règles de pédotransfert établies pour la BDSol-250 ne peuvent pas être appliquées à la BDSol-1M car la précision sémantique de cette dernière n'est pas suffisante.

Une analyse de sensibilité du modèle permettrait quant à elle d'analyser le poids des différents paramètres d'entrée du modèle et de les hiérarchiser. De futures validations terrain devraient également venir en appui de ces investigations, pour réajuster les règles de pédotransfert spécifiques au contexte méditerranéen et établies pour la BDSol-250.

Confrontation aux enjeux

L'établissement d'un indicateur « enjeu urbain » a permis de dépasser le concept d'aléa décrivant la probabilité d'occurrence d'un phénomène érosif en un point donné. Concernant l'enjeu « qualité de l'eau » et l'« enjeu viticole », les indicateurs développés mériteraient d'être étayés. L'indicateur de qualité des eaux superficielles pourrait par exemple être complété par les valeurs de turbidité mesurées sur les points d'AEP (Alimentation en Eau Potable - données DRASS) ou les mesures de phosphore du RNB (Réseau National de Bassin) à l'origine de l'eutrophisation des cours d'eau.

Pour approcher la notion de risque, il faudrait poursuivre cette étude en intégrant les politiques de prévention mises en œuvre pour limiter la vulnérabilité des trois enjeux majeurs décrits ci-dessus. L'analyse de la « mitigation », ou mise en œuvre de mesures destinées à réduire les dommages associés à des risques naturels ou générés par les activités humaines, permettrait ainsi d'intégrer tous les facteurs du risque érosion tels que décrit dans le modèle DPSIR (driving forces - pressions - state - impact - responses) ou FPEIR (forces motrices - pressions - état - impact - réponses) (Van Camp *et al.*, EUR 21319 EN/2 2004). Ce modèle développé par l'Agence Européenne pour l'Environnement, vise à décrire les interactions entre la société et l'environnement à l'aide d'indicateurs et de statistiques diverses. Notre étude pourrait ainsi être enrichie des mesures préventives - le volet « réponses » du modèle DPSIR - par l'intégration des zonages d'aléa érosif, qui seront réalisés à court terme à la demande des préfets dans le cadre de l'application de la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels. Il en va de même pour l'analyse des politiques de gestion de l'eau mises en place localement dans le cadre des SDAGE, des contrats de nappe... Enfin, l'étude de l'application des recommandations agricoles visant à diminuer les phénomènes érosifs et de phytotoxicité en zones viticoles (enherbement des inter-rangs, épandage de compost...) permettrait de mesurer les résultats de la gestion environnementale des zones viticoles.

CONCLUSIONS

De nouvelles règles de pédotransfert ont été développées dans cette étude pour adapter la modélisation de l'aléa érosif au contexte méditerranéen. Ces règles permettent d'estimer les facteurs de battance et d'érodibilité à partir du taux d'éléments grossiers, de la texture, du taux de matières organiques et du taux de fer décrivant les strates de surface de la base de données BDSol-250 inhérente au Référentiel Régional Pédologique du Languedoc-Roussillon. Les cartographies obtenues montrent la variabilité interannuelle de l'aléa érosion en région Languedoc-Roussillon et font ressortir quelques zones particulièrement sensibles.

Au-delà du modèle d'estimation de l'aléa érosif déjà appliqué de nombreuses fois, nous avons établi pour cette étude des indicateurs permettant d'appréhender les enjeux. Nous nous sommes focalisés sur les enjeux : urbains, qualité des eaux superficielles et viticoles. Ces indicateurs ont permis de montrer que les zones d'habitat concentré en zones littorales et notamment les zones péri-urbaines entourant les grandes villes sont les plus sensibles. L'estimation de l'influence de l'aléa érosif sur la qualité des eaux superficielles a quant à elle montré une forte influence du facteur saisonnier sur l'altération de la qualité des eaux superficielles, notamment par des teneurs en MES plus élevées en automne. Enfin, la confrontation des zones d'appellations et de l'estimation de l'aléa érosif a permis d'identifier que les vignobles les plus sensibles à l'aléa érosif sont localisés aux environs de Carcassonne et de Montpellier, les vignobles localisés en plaine littorale étant moins sensibles.

Des investigations complémentaires pourront se baser sur ces premiers résultats, pour évaluer le poids des paramètres pédologiques introduits dans le modèle et le poids des précisions sémantiques et géographiques des bases de données pédologiques utilisées. Ceci permettra de conclure quant à l'apport d'un Référentiel Régional Pédologique à l'échelle du 1/250 000 dans la précision de la spatialisation de l'aléa érosif. Les indicateurs d'enjeu pourront quant à eux être améliorés et nuancés, notamment par la prise en compte des politiques de prévention de l'érosion dans les zones de départ et les politiques visant à limiter les dommages induits par le risque érosion.

REMERCIEMENTS

Nous remercions L'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse qui nous a fourni les données de MES pour la région Languedoc-Roussillon et la Chambre Régionale d'Agriculture du Languedoc-Roussillon qui nous a fourni les limites des zonages d'AOC.

BIBLIOGRAPHIE

- Cerdà A., 2001 - Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52, pp. 59-68.
- COM(2002) 179 final, 2002 - Communication de la commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social et au comité des régions : Vers une stratégie thématique pour la protection des sols. Commission des Communautés Européennes, 39 p.
- Daroussin J. et King D., 1996 - A 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.
- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin J.C., Fort J.L., Falipou P., Arrouays D., 2004 - Le système d'information national sur les sols : DONESOL et les outils associés. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 11, 3, 2004 - pp. 255 à 269.
- IFEN, 2005 - Les changements d'occupation des sols de 1990 à 2000 : plus d'artificiel, moins de prairies et de bocages. Coll. Données de l'environnement n° 101.
- IFEN, 2003 - L'environnement en Languedoc-Roussillon. Coll. Les cahiers régionaux de l'environnement - Ifen. 168 p.
- INSEE, 2005 - Population par région aux derniers recensements (population sans doubles comptes). Disponible sous http://www.insee.fr/fr/insee_regions/languedoc/rfc/chifcle_fiche.asp?nat=1&ref_id=CMRSOS02137&tab_id=470 (vérifié le 24 octobre 2006).
- INSEE modèle OMPHALE 2000, 2005 - Projection de population pour le Languedoc-Roussillon et ses départements. Disponible sous http://www.insee.fr/fr/insee_regions/languedoc/rfc/chifcle_fiche.asp?ref_id=POPOP004&tab_id=1349 (vérifié le 24 octobre 2006).
- 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, 1995, pp. 153-172.
- King D., Hardy R., Le Bissonnais Y., 1991 - Evaluation spatiale de la sensibilité à l'érosion hydrique des terres agricoles de la région Nord-Pas-de-Calais. INRA SESCPF - Conseil Régional de la Région Nord-Pas-de-Calais, 208 p.
- King D., Le Bissonnais Y., Hardy R., 1993 - Regional assessment of runoff and erosion risk. Example of the Nord/Pas-de-Calais region, France. p. 191-205. In *Farm land erosion : in temperate plains environment and hills / Proceedings of the International symposium on farm land erosion*, Paris, Saint-Cloud, France, 25-29 May 1992 ; ed. by Stanislas Wicherek. Ed Elsevier ; Amsterdam (NLD). 587 p.
- Le Bissonnais Y., Daroussin J., Jamagne M., Lambert J.-J., Le Bas C., King D., Cerdan O., Léonard J., Bresson L.-M., Jones R.J.A., 2005 - Pan-European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Database using pedotransfer rules. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, Vol.2 N° 1 (2005) pp.1-15.
- Le Bissonnais Y., Dubreuil N., Daroussin J., Gorce M., 2004 - Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 11,3, 2004, pp. 307-321
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King, D., 2002 - Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena* 46 (2002) pp. 207-220.
- Le Bissonnais Y., King D., Daroussin J., Thorette J., Montier C., 1998 - Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France. *Etudes et travaux : INRA Orléans - IFEN* 63 p.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 2002 - L'érosion hydrique des sols en France. INRA Orléans - IFEN 108 p.
- MEDD & Agences de l'eau, 2003 - Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau - Grilles d'évaluation SEQ-Eau (Version 2) - 40 p.
- Météo France, 2006 - Disponible sous <http://www.meteofrance.com/FR/climat/france.jsp> (vérifié le 24 octobre 2005).
- Morschel J., Fox D., 2004 - Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort lauragais. *Mappemonde* N°76 (4-2004). Disponible sous <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.html> (vérifié le 24 octobre 2006).
- PASER, 2004 - Les Projets d'Action Stratégique de l'Etat en Languedoc-Roussillon. Disponible sous <http://www.languedoc-roussillon.pref.gouv.fr/grandsdossiers/paser/index.shtm>, (vérifié le 24 octobre 2006).
- Poesen J.W.A. & van Wesemael B., 1995 - Effects of rock fragments on the structural collapse of tilled topsoils during rain. *Kluwer Academic Publishers*, 1995, Vol. 468 : pp. 333-343.
- Poesen J.W.A., Parsons A.J., Abrahams A.D., 1992 - Mechanisms of overland flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rock fragments. *University College London Press*, 1992, pp. 275-305.
- Singer M.J., Le Bissonnais Y., 1998 - Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a Mediterranean climate. *Geomorphology* 24 (1998) pp. 79-85.
- Souadi T., King C., Bourguignon A., Maurizot P., Denis L., Le Bissonnais Y., Souchère V., Lecour A., 2000 - Cartographie Régionale de l'aléa érosif des sols en région Haute-Normandie. BRGM - INRA, Rapport BRGM.
- Van-Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.-R., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C. and Selvaradjou S.-K., 2004 - Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/1, 872 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Van Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.-R., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C. and Selvaradjou S.-K., 2004 - Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/2, 872pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L., 2000 - Estimation du risque d'érosion en Italie, EUR 19022 FR Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 47 p.
- Van Wesemael B., Poesen J., de Figueiredo T., 1995 - Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall. *Soil & tillage research*, 1995, 33, pp. 229-250.
- Veyret Y. et Reghezza M., 2005 - Aléas et risques dans l'analyse géographique. *Annales des Mines*, octobre 2005, n°40, pp. 61-69.
- Vrieling A., 2006 - Satellite remote sensing for water erosion assessment : A review. *Catena* 65, pp. 2-18.
- Wischmeier, W. H., Mannering J. V., 1969. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33, 131-137.

