



HAL
open science

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

Véronique Antoni, Yves Le Bissonnais, Jacques Thorette, Najat Zaidi, Bertrand Laroche, Sylvie Barthès, Joël J. Daroussin, Dominique D. Arrouays

► To cite this version:

Véronique Antoni, Yves Le Bissonnais, Jacques Thorette, Najat Zaidi, Bertrand Laroche, et al.. 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. *Étude et Gestion des Sols*, 2006, 13 (3), pp.201-222. hal-02663790

HAL Id: hal-02663790

<https://hal.inrae.fr/hal-02663790v1>

Submitted on 31 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1 Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à

2 l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250.000 et

3 confrontation aux enjeux locaux

4

5 V. Antoni⁽¹⁾, Y. Le Bissonnais⁽²⁾, J. Thorette⁽¹⁾, N. Zaidi⁽³⁾, B. Laroche⁽³⁾,

6 S. Barthès⁽⁴⁾, J. Daroussin⁽⁵⁾, D. Arrouays⁽³⁾

7

8 (1) IFEN, 5 route d'Olivet - BP 16105 - 45061 ORLEANS CEDEX, France.

9 (2) INRA, LISAH Campus AGRO - 2 place Viala - 34060 MONTPELLIER Cedex 1, France.

10 (3) INRA, Unité INFOSOL, 2163 Avenue de la Pomme de Pin - BP 20619 ARDON - 45166 OLIVET CEDEX, France.

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

12 (5) INRA, Unité de Science du Sol, 2163 Avenue de la Pomme de Pin - BP 20619 ARDON - 45166 OLIVET CEDEX, France.

13

14 RESUME

15 L'érosion est un des processus majeurs de la dégradation des sols. Il est donc primordial d'appréhender l'aléa érosif
16 pour protéger la ressource sol. Nous avons appliqué un modèle hiérarchique, à l'aide d'un Système d'Information
17 Géographique, pour cartographier l'aléa érosif des sols. Il combine différents paramètres, par ordre d'importance :
18 occupation du sol, battance, pente, érodibilité, hauteur et intensité des pluies. Les facteurs de battance et d'érodibilité sont
19 établis à partir de paramètres issus des bases de données pédologiques par des règles de pédo-transfert. L'étude a porté
20 sur la région du Languedoc-Roussillon, d'une part parce qu'elle est couverte par une base de données pédologiques
21 (BDSol-250) à l'échelle du 1/250.000 et d'autre part parce que la modélisation de l'aléa érosif à l'échelle régionale n'a pas
22 encore fait l'objet d'une étude en milieu méditerranéen. Développée originellement pour d'autres études, cette modélisation
23 a nécessité la définition de nouvelles règles de pédo-transfert appliquées à la BDSol-250 pour tenir compte des spécificités
24 du milieu méditerranéen. Ces règles s'appuient sur le taux de pierrosité, la texture, ainsi que la teneur en matières
25 organiques et en fer des horizons de surface des sols. La modélisation permet de cartographier les zones d'aléa érosif fort
26 qui sont ensuite confrontées aux enjeux urbains, environnementaux (enjeu de qualité de l'eau) et économiques (enjeu
27 viticole) identifiés en région Languedoc-Roussillon. Quatre indicateurs sont ainsi proposés : l'indicateur « coulées
28 boueuses » (spatialisation du nombre de coulées boueuses par communes), l'indicateur « enjeu urbain » (combinaison de la
29 densité de population, de l'évolution de la population et de l'artificialisation), l'indicateur de qualité de l'eau (teneurs en

30Matières en Suspension - MES - dans les eaux de surface), l'enjeu viticole enfin (spatialisation des zonages d'aptitude
31AOC). La confrontation des zones d'aléa et des zones d'enjeux montre l'intérêt de poursuivre ces investigations pour
32intégrer le risque érosif dans les politiques de prévention.

33

34

35**Mots Clés** : érosion, aléa, contexte méditerranéen, modèle hiérarchique, règles de pédo-transfert, battance, érodibilité,
36texture, cartographie, Système d'Information Géographique, Modèle Numérique de Terrain, base de données sol, enjeux,
37artificialisation, matières en suspension (MES).

38

39SUMMARY

40**Modelling soil erosion risk with a Regional Pedologic Reference frame on a 1:250,000 scale and comparison with**
41**the stakes**

42Soil erosion is a major process in soil degradation. In order to protect the soil resource, it is therefore essential to apprehend
43the erosion risk. We applied a hierarchical model within a Geographical Information System in order to map the soil erosion
44risk. This model combines several parameters, in order of their importance: land use, soil crusting, slope, soil erodibility and
45rainfall height and intensity. Soil crusting and soil erodibility factors are assessed through pedotransfer rules. The work
46focuses on the Languedoc-Roussillon region for two reasons. On the one hand because an accurate soil database is
47available for this region, namely the BDSol-250 on a 1:250,000 scale, on the other hand because erosion risk modelling at
48regional scale has never been applied to Mediterranean areas before. New pedotransfer rules have been developed in order
49to adapt an existing model to the specificities of the Mediterranean milieu. These rules take into account the soil stoniness,
50the texture, the organic matter and iron contents. The modelling allows delineating the high erosion risk areas, which are
51then confronted with the human, environmental and economical stakes identified for the Languedoc-Roussillon region. Four
52indicators are proposed: mudflows indicator (delineation of the number of mudflows by municipalities), urban stake indicator
53(combination of the population density, the population evolution and the soil sealing evolution), water quality indicator
54(content of suspended matter – MES- in the surface water), wine stake (mapping of the AOC wine aptitude). The comparison
55between the erosion risk areas and the stakes areas shows the necessity to continue the investigations allowing the
56integration of the erosion risk in the preventing policies.

57

58**Keywords** : *erosion, risk, Mediterranean context, hierarchical model, pedotransfer rules, soil crusting, soil erodibility, texture,*
59*mapping, Geographical Information System, Digital Elevation Model, soil database, stakes, soil sealing, suspended matters*
60*(MES).*

61

62

63 L'érosion résulte de la dégradation des couches superficielles de la couverture pédologique et du déplacement des
64matériaux les constituant. Ce processus généré sous l'action d'agents climatiques naturels (eau, vent, rivières, glaciers) est
65souvent renforcé par les pressions anthropiques exercées sur les sols (intensification de l'agriculture, surpâturage,
66déforestation, culture à faible recouvrement, artificialisation et imperméabilisation des surfaces). Notre étude porte sur
67l'érosion hydrique des sols agricoles, qui a été étudiée dans les régions tempérées et de grandes cultures du Nord-Ouest de
68l'Europe depuis les années 1980 (Le Bissonnais *et al.*, 2005).

69 L'érosion hydrique caractérise le départ de sol sous l'action du ruissellement des eaux de pluies ne pouvant s'infiltrer
70dans le sol. Ce phénomène est accentué sous les conditions suivantes : occupation du sol peu couvrante, sols limoneux
71enclins à la fermeture de la porosité de surface générant une croûte de battance, pentes fortes, forte érodibilité des
72matériaux, agressivité des pluies. L'érosion hydrique touche 26 millions d'hectares dans l'UE et concernerait 26 fois plus de
73surface que l'érosion éolienne (Van Camp *et al.*, EUR 21319 EN/1 2004). Ce processus de dégradation des sols tend à être
74intégré dans les politiques de protection environnementale. Ainsi, au niveau européen, l'érosion a été identifiée comme l'une
75des huit menaces à prendre en compte dans la stratégie thématique pour la protection des sols en Europe (COM(2002) 179
76final, 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
772003 (n°2003-699) prévoit des mesures de lutte contre l'érosion des sols et la nécessité de « réaliser un zonage des risques
78d'érosion » sous la responsabilité des préfets. La mise en place au niveau local de cette politique de lutte contre l'érosion
79nécessite donc d'une part une connaissance approfondie des phénomènes érosifs et d'autre part leur spatialisation afin
80d'accompagner les prises de décision des gestionnaires de l'environnement (mesures agri-environnementales visant à
81limiter les phénomènes d'érosion, mesures de prévention des coulées boueuses, ...).

82 Différentes méthodes d'estimation de l'aléa érosion des sols sont couramment utilisées : CORINE, RIVM, GLASOD, Hot-
83Spot approach of EEA, USLE, INRA, PESERA (Van Camp *et al.*, EUR 21319 EN/2 2004). Le modèle retenu pour cette étude
84est le modèle INRA, qui permet l'utilisation de données de résolution et de qualité hétérogènes, qui est plus précis que le
85modèle CORINE érosion et enfin, qui ne nécessite pas l'utilisation de données non disponibles à notre échelle d'étude
86comme le modèle USLE (Le Bissonnais *et al.*, 2002). La modélisation de l'aléa érosif a été abordée à l'échelle régionale en
87France dès les années 1990. Une approche mécaniste des phénomènes érosifs n'étant pas envisageable à cette échelle,

88 King *et al.* (1991 ; 1993) montrent que l'appréhension des phénomènes érosifs nécessite l'intégration par USI (Unité Spatiale
89 d'Intégration), d'un certain nombre de facteurs tels que la sensibilité des sols à la battance, la proportion de terres labourées
90 et les précipitations.

91 Notre étude a pour but de tester la faisabilité d'une délimitation des zones à risques pour répondre aux demandes des
92 préfets de départements, pour les départements disposant de données pédologiques suffisamment précises. Dans ce
93 contexte, nous avons travaillé sur la région Languedoc-Roussillon, d'une part parce qu'elle est couverte par un Référentiel
94 Régional Pédologique au 1/250.000 et qu'aucune expérience de zonage de l'aléa érosif n'a été réalisée à partir de ce type
95 de base de données géographiques. D'autre part, l'aléa érosif n'a pas été estimé à l'échelle régionale en milieu
96 méditerranéen jusqu'ici.

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

103

104 PRINCIPES DE LA MODELISATION DE L'ALEA EROSION

105

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

115 Dans cette étude, nous utilisons un modèle de type système expert, hiérarchique et arborescent déjà utilisé pour
116 modéliser l'aléa érosif à différentes échelles : France entière au 1/1.000.000 (Le Bissonnais *et al.*, 2002), régionale en
117 Haute-Normandie au 1/50.000 (Souadi *et al.*, 2000), départementale dans l'Aisne au 1/25.000 (Le Bissonnais *et al.*, 2004). Il

118est appliqué à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) par la combinaison logique de différents facteurs pris
119dans l'ordre de leur importance vis-à-vis du phénomène d'érosion des sols, à savoir (Figure 1) : l'occupation du sol, la
120battance des sols, l'intensité de la pente, l'érodibilité des sols, l'érosivité des pluies (facteur combiné de leur hauteur et
121intensité) (Le Bissonnais et *al.*, 1998, 2002).

122 Les trois facteurs extrinsèques aux sols (occupation du sol, pente, érosivité des pluies), sont déterminés respectivement
123à partir des bases de données suivantes : CORINE Land Cover 1990 ou 2000 à l'échelle du 1/100.000, Modèle Numérique
124de Terrain de l'Institut Géographique National (MNT IGN) au pas de 250m et données pluviométriques de Météo-France
125Aurhély au pas de 5km.

126 Les deux facteurs intrinsèques aux sols (battance et érodibilité des sols), sont établis à partir de paramètres issus des
127bases de données pédologiques par des règles de pédotransfert (Daroussin et King, 1996). La battance traduit la sensibilité
128des sols à la fermeture de la porosité, formant une croûte superficielle qui colmate la surface du sol et réduit l'infiltration des
129précipitations. L'érodibilité traduit la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent sous
130l'action des gouttes de pluies et/ou de l'écoulement (Le Bissonnais et *al.*, 2005). Dans cette étude, la base de données
131pédologiques utilisée pour déterminer les facteurs de battance et d'érodibilité est la Base de Données des Sols du
132Languedoc-Roussillon (BDSol-250) à l'échelle du 1/250.000. La structure de la BDSol-250 combine une base géographique
133localisant spatialement des objets cartographiés et une base sémantique décrivant et gérant les objets au sein d'un Système
134de Gestion de Base de Données Relationnelles selon le principe de la base DONESOL (Grolleau et *al.*, 2004). Ainsi, BDSol-
135250 associe chaque Unité Cartographique de Sols (UCS) décrite par sa géométrie (ensemble de polygones) à une ou
136plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS), décrites par leur mode d'agencement et le pourcentage de surface qu'elles
137occupent au sein de l'UCS (Jamagne et *al.*, 1995). Les UTS sont elles-mêmes composées de strates ou couches de sol qui
138décrivent la variabilité spatiale latérale et verticale des paramètres du sol par les valeurs minimales, maximales et modales
139de variables qualitatives (descriptives) et quantitatives (données analytiques physico-chimiques). Seuls les horizons de
140surface sont susceptibles de subir les manifestations érosives (Le Bissonnais et *al.*, 2004). Les informations qui décrivent les
141strates de profondeur ne sont donc pas considérées dans cette étude. Enfin, seules les valeurs modales des variables qui
142nous intéressent sont prises en compte.

143

144Adaptation au contexte méditerranéen

145 Les règles de pédotransfert appliquées à la Base de Données des Sols de France à l'échelle du 1/1.000.000 (BDSol-1M)
146et définies dans les études antérieures ont été adaptées pour tenir compte de la meilleure précision sémantique de la
147BDSol-250 et des spécificités des sols en milieu méditerranéen. Contrairement à la modélisation de l'aléa érosif appliquée à

148l'échelle de la France entière ou à l'échelle départementale de l'Aisne et du fait de la spécificité des sols de la région
149Languedoc-Roussillon, le paramètre d'ordre 1 retenu pour les facteurs de battance et d'érodibilité est la teneur en éléments
150grossiers et non la texture de l'horizon de surface (Figure 2). La pierrosité favorise l'infiltration au détriment du ruissellement,
151diminuant ainsi les phénomènes de battance et l'érodibilité. De nombreux travaux ont en effet montré que la présence
152d'éléments grossiers améliore la résistance au ruissellement en diminuant la dégradation physique de l'horizon de surface –
153réduction de la fermeture de la porosité de surface et diminution de la désagrégation des agrégats – et en augmentant la
154rugosité de surface, diminuant ainsi les taux d'érosion (Poesen et *al.*, 1992 ; Poesen et Van Wesemael, 1995 ; Van
155Wesemael et *al.*, 1995 ; Cerda, 2001). Le facteur pierrosité est estimé de deux manières : par le taux d'éléments grossiers
156modal défini pour chaque strate de surface lorsque l'information est disponible et elle est complétée par la principale
157contrainte définie pour chaque UTS lorsque celle-ci est renseignée et porte sur la pierrosité.

158 Les valeurs de battance et d'érodibilité sont ensuite affinées par les données texturales des strates projetées dans des
159triangles de battance et d'érodibilité établis pour cette étude (Figure 3), à partir de règles basées sur les mêmes principes
160que ceux présentés dans les études précédents (Le Bissonnais et *al.*, 2002 ; 2004 ; 2005) et qui sont décrites ci-dessous.

161 Les classes de battance et d'érodibilité ainsi obtenues à partir de la teneur en éléments grossiers et de la texture sont à
162nouveau affinées par des règles de pédotransfert supplémentaires prenant en compte les teneurs en matières organiques et
163en fer qui favorisent la stabilité structurale des sols (Le Bissonnais et *al.*, 2005) (Figure 2). En effet, sous climat
164méditerranéen, on trouve des sols pour lesquels la faible teneur en matières organiques peut être compensée par des
165teneurs en oxydes de fer importantes, limitant la formation d'une croûte de battance et l'érodibilité (Singer et Le Bissonnais,
1661998).

167 Les seuils suivants ont été retenus sur une base phénoménologique, confortée par l'étude statistique de la distribution
168de ces différents paramètres : 10% et 50% pour le taux de pierrosité, 2% et 5% pour la teneur en matières organiques et 3%
169pour la teneur en fer.

170

171Règles de pédotransfert appliquées à BDSol-250 pour le Languedoc-Roussillon

172Les quatre règles de pédotransfert retenues s'enchaînent de la manière suivante (Figure 2) :

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

178

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

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

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

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

186

187

188 **CARTOGRAPHIE DE L'ALEA EROSION POUR LA REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON**

189 **Aléa érosif annuel et saisonnier – information pixellaire**

190 L'ensemble des couches d'information nécessaire à l'application du modèle se présente sous forme pixellisée (raster). La
191 résolution de ces couches raster, dictée par celle du MNT utilisé, est de 250 m. Chaque pixel fournit ainsi les paramètres
192 nécessaires au modèle d'aléa qui produit donc un résultat par pixel.

193 L'histogramme de la figure 4a et les cartes de la figure 5 représentent la répartition des différentes classes d'aléa érosif par
194 pixel pour la région du Languedoc-Roussillon. La majorité de la superficie de la région est classée en aléa très faible (classe
195 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%.
196 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%
197 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
198 annuelle.

199 La visualisation concomitante des cartes saisonnières (Figures 5b, 5c, 5d, 5e) et de la carte annuelle (Figure 5a), met en
200 évidence la variabilité interannuelle de l'aléa érosif sous climat méditerranéen. L'aléa est prégnant en automne (Figure 5d) et
201 un peu moins en hiver (Figure 5e) : ceci est à mettre en relation avec les fortes précipitations orageuses se produisant de
202 l'automne au printemps mais surtout en septembre et en octobre. Ces épisodes sont particulièrement courants dans les
203 départements de l'Hérault et du Gard : les normales de précipitations diffusées par Météo France pour la période 1971-2000
204 indiquent en effet un pic pluviométrique de 100 mm en octobre pour l'Hérault et de 135 mm pour le Gard (Météo France,
205 2006).

206 L'analyse de ces cartes met également en exergue quelques zones particulièrement sensibles à l'aléa érosif : sur la partie
207 occidentale des contreforts pyrénéens, autour de Carcassonne et de Perpignan, tout le long de la côte méditerranéenne

208entre Narbonne et Nîmes et autour d'Alès. On peut par ailleurs noter que la modélisation de l'aléa érosif annuel a tendance
209à lisser l'aléa, ne faisant plus ressortir que les zones entourant Carcassonne, Montpellier et la zone entre Nîmes et Alès.

210

211

212Aléa érosif annuel et saisonnier - intégration par bassins versants

213Présentées ainsi, les cartes sont difficilement exploitables. Nous avons donc synthétisé l'aléa érosif annuel et saisonnier
214pour différents types d'Unités Spatiales d'Intégration (USI) : unités spatiales de prises de décision administratives (cantons,
215communes) et unités spatiales fonctionnelles (petites régions agricoles, bassins versants RNDE – Réseau National des
216Données sur l'Eau). Les règles d'intégration de l'information pixellaire par USI qui ont été développées, prennent en compte
217les pourcentages de surface de chaque classe d'aléa contenue dans chaque USI (Le Bissonnais et *al.*, 2004). L'aléa intégré
218par 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
219fort 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.*,
2202004). Seules les cartes résultant de l'intégration par bassins versants RNDE, sont présentées ici (Figure 6). Sur 306
221bassins versants, 90.8% sont affectés d'un aléa très faible à faible (Figure 4b). Seuls 1,3% d'entre eux sont affectés d'un
222aléa fort à très fort.

223L'analyse simultanée des cartes d'aléa érosif (Figure 6) et des cartes sources entrées dans le modèle (Figure 7), permet de
224distinguer quelques zones et d'apporter une ébauche d'explication :

- 225 - la zone située au sud-ouest de Carcassonne où l'aléa érosif fort est à mettre en relation avec la présence de
226 vignobles particulièrement sensibles à l'érodibilité et une agressivité des pluies forte,
- 227 - 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
228 présentant une forte érodibilité,
- 229 - la Lozère où l'aléa est très faible à faible quelle que soit la saison considérée, en raison d'une battance faible et de
230 la prédominance de forêts et de prairies peu sensibles à l'érosion,
- 231 - la zone entre Nîmes et Alès où l'aléa est moyen à fort : les cultures permanentes, la battance, l'érodibilité et
232 l'agressivité de la pluie fortes en sont l'origine,
- 233 - deux bassins versants sur les contreforts pyrénéens montrent un aléa fort à très fort en automne : les pentes
234 fortes, des sols érodibles et une agressivité des pluies fortes peuvent expliquer un tel aléa même si l'occupation
235 des sols est caractérisée en majorité par des zones forestières peu sensibles à l'érosion.
- 236 - la plaine littorale enfin, montre quelques bassins versants pour lesquels l'aléa érosif est moyen en automne, mais
237 faible pour les autres saisons : malgré une battance et une érodibilité des sols fortes et une occupation du sol

238 caractérisée par des vignobles particulièrement sensibles à l'érosion, l'aléa faible est à mettre ici en relation avec
239 une agressivité des pluies faible à moyenne.

240

241

242

243 **CONFRONTATION SPATIALE DES ZONES D'ALEA EROSIF FORT AUX ZONES D'ENJEU**

244

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

251 La vulnérabilité des enjeux restant difficile, voire impossible à évaluer à ces échelles de travail, nous nous attacherons à
252 étudier les enjeux susceptibles d'être affectés par l'aléa érosif modélisé précédemment et à confronter les deux types de
253 zonage. Les conséquences de ce phénomène naturel peuvent être appréhendées en analysant les enjeux susceptibles de
254 subir des dommages en aval des zones de départ. Les enjeux exposés à l'aléa érosif peuvent être humains,
255 environnementaux ou matériels et économiques. Nous allons successivement développer ces trois axes en analysant les
256 gênes occasionnées aux zones d'habitat, aux écosystèmes hydriques et enfin aux zones de productions viticoles.

257

258 **L'enjeu urbain : coulées boueuses et urbanisation**

259 La région Languedoc-Roussillon compte 2,46 millions d'habitants, pour 27376 km², ce qui représente une densité de 90
260 hab./km². La population est très inégalement répartie sur le territoire : elle se concentre préférentiellement dans la zone
261 littorale entre Narbonne et Nîmes avec une densité de près de 220 hab./km², tandis que la Lozère, département
262 montagneux, est le département français le moins peuplé avec seulement 14 hab./km² (Ifen, 2003).

263 La croissance démographique en Languedoc-Roussillon est deux fois plus élevée que la moyenne française, soit environ
264 1,1% par an depuis 1962 (PASER, 2004) et la plus importante en France métropolitaine. Ceci résulte du solde migratoire
265 excédentaire généré par l'attrait du « Mezzogiorno » français. Ainsi, la population a-t-elle augmenté de 8,5% de 1990 à
266 1999, soit plus du double de la moyenne nationale s'élevant à 3,6% pour la même période (INSEE, 2005). Une étude de

267 projection de la population à l'horizon 2030 réalisée par l'INSEE (INSEE modèle OMPHALE 2000, 2005) fait état d'une
268 augmentation possible de 31% de la population d'ici 2030. Cette croissance démographique induit une occupation
269 croissante de l'espace : développement des zones d'habitation, des zones d'activités économiques, des infrastructures. Les
270 surfaces bâties et les surfaces destinées aux infrastructures de communication ont ainsi augmenté de 18 % au cours de ces
271 10 dernières années, contribuant à accroître l'artificialisation du territoire qui atteint 6,5% de la superficie régionale (Ifen,
272 2003). Cet étalement urbain s'effectue principalement au détriment des surfaces agricoles. La pression urbaine sur les sols
273 agricoles est directement perceptible dans les paysages par la constitution d'un mitage en zone péri-urbaine.

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

277

278 **Indicateur « coulées boueuses »**

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

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

289 La carte de répartition des coulées boueuses (Figure 8a) dévoile une distribution hétérogène sur le territoire régional. La
290 majorité des coulées boueuses sont localisées sur les départements de l'Aude (730 coulées boueuses) et de l'Hérault (569
291 coulées boueuses), soit 63% du total. La Lozère recense peu de coulées boueuses avec seulement 80 déclarations, soit
292 3,9% du total régional. Dans ce département moins peuplé que les autres, les coulées boueuses engendrent potentiellement
293 moins de dégâts matériels ou humains et ne font donc pas forcément l'objet d'une déclaration de catastrophe naturelle.

294 Les communes ayant déclaré des coulées boueuses se situent plutôt en aval des zones d'aléa érosif fort et sont distribuées
295 préférentiellement le long des cours d'eau (Figure 8a). En effet, 646 communes ayant déclaré au moins une coulée
296 boueuse, intersectent le réseau hydrographique. Elles représentent 1336 coulées boueuses, soit 65% des coulées

297recensées entre 1985 et 2000 et couvrent 12 960 km², soit 62% de la superficie totale de la région Languedoc-Roussillon.
298De plus, 287 communes localisées dans une zone tampon de 3km de part et d'autre du réseau hydrographique (BD
299Carthage), totalisent 403 coulées boueuses, soit 19% des coulées déclarées entre 1985 et 2000. Ces communes couvrent
3002 416 km², soit 8,8% de la superficie totale de la région Languedoc-Roussillon.

301Les coulées boueuses sont très concentrées dans la zone située entre Béziers, Carcassonne et Perpignan. Ainsi les
302communes situées aux alentours de Narbonne ont recensé jusqu'à 7 coulées sur leur territoire. Elles se situent à la
303confluence entre l'*Aude*, l'*Orbieu* et la *Cesse*. De même, la zone située entre *le Gard* et *le Vidourle* (entre Nîmes et Alès) et
304celle située en amont de la confluence entre *la Peyne* et *l'Hérault*, recensent un grand nombre de coulées boueuses et
305présentent un aléa érosif fort. Le réseau hydrographique situé en aval de ces zones d'aléa fort et très fort, intersecte 248
306communes (soit 16% des communes) recensant au minimum une coulée boueuse et couvrant 4 460 km² (également 16%
307de la superficie totale de la région).

308La confrontation cartographique entre les coulées boueuses, l'aléa érosif et le réseau hydrographique, a donc montré que
309les coulées boueuses se distribuent préférentiellement en aval des zones d'aléa érosif fort, le long des cours d'eau et sont
310particulièrement concentrées en amont de la confluence de certains cours d'eau.

311

312Indicateur « enjeu urbain » proposé

313Un indicateur « enjeu urbain » est établi pour rendre compte du phénomène d'urbanisation par lequel l'habitat affecte les
314territoires attractifs. L'urbanisation est ici définie par « les territoires artificialisés » de la nomenclature CORINE Land Cover,
315à laquelle on ajoute l'aspect dynamique en tenant compte des évolutions. Cette méthode nous semble préférable à
316l'utilisation de seuils de densité combinés avec des critères d'accessibilité, principalement pour deux raisons :

317 - les seuils de densité non modulés par les aspects évolutifs mettraient en exergue les centres urbains, alors que
318 ceux-ci sont théoriquement les derniers touchés, les coulées boueuses devant préalablement traverser les zones
319 péri-urbaines,

320 - les informations nécessaires à la définition de critères d'accessibilité sont difficilement modélisables.

321

322Etablissement de l'indicateur

323Cet indicateur est construit à partir des données suivantes : la densité de population en 1999 (sources : INSEE), l'évolution
324de la population entre 1990 et 1999 (sources : INSEE), et l'évolution de l'artificialisation du territoire entre 1990 et 2000
325(sources : CORINE Land Cover 1990 et 2000).

326La densité de population est le critère le plus important dans la définition de l'indicateur d'enjeu urbain. En effet, les
327populations sont d'autant plus vulnérables qu'elles sont concentrées dans des zones particulièrement urbanisées, peu
328propices à des évacuations d'urgence. L'échelle de gravité des dommages produite par le ministère de l'Écologie et du
329Développement Durable, classe les événements naturels en six classes basées sur les dommages humains. Elles
330s'échelonnent de l'incident (aucun blessé) jusqu'à la catastrophe majeure (1000 morts ou plus).

331L'évolution démographique permet quant à elle de prendre en compte la dynamique des territoires : les zones en mutation
332sur un pas de temps de 10 ans peuvent ainsi être mises en exergue.

333L'artificialisation des territoires concerne tout d'abord les zones urbanisées, industrielles ou commerciales, ensuite les
334réseaux de communication, les mines, décharges et chantiers et les espaces vert artificialisés. L'évolution de l'artificialisation
335permet ainsi d'aborder les enjeux économiques par la prise en compte des dégâts matériels pouvant affecter les zones
336d'habitat.

337L'indicateur « enjeu urbain » est défini de la manière suivante :

$$338 \quad ENJEU \text{ URBAIN} = f [(densité \text{ de population } 1999), (évolution \text{ de la population } 1990-1999), \\ 339 \quad (évolution \text{ de l'artificialisation } 1990-2000)]$$

340Les 3 facteurs sont comparés aux seuils de 80 hab./km², 8,5 % et 4,8%, correspondant respectivement à la densité de
341population moyenne de la région Languedoc-Roussillon en 2000, à l'évolution démographique moyenne de la région
342Languedoc-Roussillon, et à l'évolution de l'artificialisation moyenne nationale pour la période 1990-2000 (Ifen, 2005). La
343comparaison pour chacune des 1545 communes du Languedoc-Roussillon des valeurs réelles obtenues pour les 3 facteurs
344de l'indicateur d'enjeu urbain aux seuils choisis, permet d'identifier les communes pour lesquelles l'évolution de
345l'artificialisation est la plus forte.

346La figure 9a liste les différentes combinaisons obtenues pour chacun des trois paramètres définissant l'indicateur, et expose
347comment elles ont été agrégées pour obtenir un indicateur d'enjeu urbain en 5 classes, s'échelonnant de « enjeu nul » à
348« enjeu très fort ».

349

350 **Interprétation des résultats**

351La spatialisation de cet indicateur (Figure 8b) montre que l'enjeu urbain est très fort en zone littorale, alors que pour 42,7%
352des communes l'enjeu est nul, et pour 31,2% l'enjeu est très faible. Les grandes villes comme Nîmes, Montpellier et
353Perpignan, montrent un enjeu moyen. Narbonne, classée avec un enjeu faible fait exception malgré une densité de
354population de 265 hab./km². Ceci est dû à une évolution de la population faible entre 1990 et 1999 n'atteignant que 1,4% et
355un taux d'artificialisation de 2,6%, également faible sur la même période. L'enjeu est fort pour 9,1% des communes : celles-

356ci sont localisées principalement dans la couronne périurbaine entourant les grandes villes et avec une petite extension le
357long du littoral du Gard. Enfin, 5,6% des communes présentent un enjeu très fort : elles sont circonscrites dans la zone
358périurbaine la plus proche des grandes villes avec une extension vers les communes littorales : ce phénomène est
359particulièrement visible pour Perpignan, Béziers et Montpellier. En-dehors des zones littorales, seules Carcassonne et Alès
360et leurs communes périurbaines sont affectées d'un enjeu moyen et fort.

361La spatialisation de l'indicateur montre que l'enjeu est plus fort en zones périurbaines que dans les grandes villes intra
362muros. En effet, l'évolution démographique et l'artificialisation des grandes villes sont limitées et se font donc au profit des
363communes périurbaines qui réunissent les trois critères de définition de l'enjeu urbain (densité de la population, évolution de
364la population et artificialisation fortes).

365En confrontant le nombre de coulées boueuses par commune et le nombre de communes affectées au sein de chaque
366classe d'enjeu, on montre que la proportion de communes ayant déclaré des coulées boueuses décroît au fur et à mesure
367que le nombre de coulées boueuses par commune augmente (Figure 9b). Seules les communes présentant un enjeu faible,
368montrent une distribution de type normale. Si 32,5% des communes n'ont pas recensé de coulées boueuses, 60,6% des
369communes ont déclaré entre 1 et 3 coulées boueuses et 6,9% plus de 3 coulées boueuses. Dans l'ensemble ce sont les
370communes non ou faiblement sensibles qui sont majoritairement affectées par des coulées boueuses, soit 47,5% des
371communes. Cela peut signifier que d'autres enjeux interviennent dans le renforcement du nombre de coulées boueuses :
372urbanisation diffuse, enjeux agricoles,... Seules 10% des communes ayant subi des coulées boueuses montrent un enjeu
373urbain fort ou très fort, comme par exemple pour la zone au nord de Narbonne, rassemblant 6 communes classées en enjeu
374fort ou très fort et recensant 33 coulées boueuses. Cette zone correspond par ailleurs à la zone de confluence entre les
375cours d'eau de l'Aude, de l'Orbieu et de la Cesse.

376La comparaison des cartes de localisation des coulées boueuses et de la spatialisation de l'indicateur d'enjeu urbain enfin,
377montre que les coulées boueuses sont moins nombreuses sur le littoral qui concentre les zones d'enjeu fort.

378

379L'enjeu « qualité de l'eau » : Matières En Suspension (MES) dans les eaux de surface

380Le maintien de la qualité des eaux souterraines et superficielles est un enjeu majeur pour la région Languedoc-Roussillon,
381en raison d'une pression agricole et urbanistique croissante. Ainsi, les prélèvements d'eau à usage agricole et domestique
382représentent chacun un tiers des prélèvements en Languedoc-Roussillon ; 85% des prélèvements d'eau à usage
383domestique proviennent des ressources souterraines et 96% des prélèvements à usage agricole des ressources
384superficielles (Ifen, 2003).

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

393

394 **Indicateur de qualité des eaux de surface**

395 Nous disposons d'un jeu de données de 5511 mesures de MES prises sur 500 points de mesure dans la période 1990-
396 2000. Ces données sont issues du Réseau National de Bassin (Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse) et ont pour
397 vocation de vérifier la qualité des eaux de surface. Il faut souligner que les mesures ne sont pas effectuées de manière
398 systématique aux mêmes dates chaque année et pour chacun des points de prélèvements, rendant une analyse
399 diachronique impossible. De même le contexte hydrologique au moment du prélèvement n'est pas connu, limitant
400 l'interprétation. Enfin, une partie de la Lozère n'est pas couverte par les campagnes de mesures de l'Agence de l'Eau Rhône
401 - Méditerranée – Corse et ne pourra donc être étudiée ici.

402 Les grilles d'interprétation du Système d'Evaluation de la Qualité de l'Eau SEQ –Eau (MEDD & Agences de l'eau, 2003),
403 permettent de traduire les valeurs de MES en classes d'aptitude à la biologie pour les eaux de surface : qualité très bonne
404 ($MES < 25 \text{ mg/l}$), bonne ($25 \leq MES < 50 \text{ mg/l}$), moyenne ($50 \leq MES < 100 \text{ mg/l}$), médiocre ($100 \leq MES < 150 \text{ mg/l}$) et très mauvaise
405 ($MES \geq 150 \text{ mg/l}$). La distribution de l'échantillon de données dont nous disposons s'effectue dans chacune de ces 5 classes
406 respectivement : 87,4% des prélèvements indiquent une qualité très bonne (dont 11,4% < au seuil de détection de 4mg/l),
407 7,5% bonne, 3,1% moyenne, 0,7% médiocre et 1,3% très mauvaise (dont 3 valeurs extrêmes s'échelonnant de 1400 à 2730
408 mg/l).

409 Pour analyser l'évolution des MES par saison, nous avons scindé l'échantillon de 5511 prélèvements en 4 sous échantillons
410 saisonniers en se basant sur les mêmes découpages que ceux utilisés dans la modélisation de l'aléa érosif : le printemps de
411 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
412 échantillons représentent respectivement 29%, 29,6%, 13,1% et 28,3%.

413 Pour analyser l'influence de l'aléa érosif sur la qualité des eaux de surface, l'aléa érosif saisonnier est croisé avec l'aire
414 drainée en amont de chaque point prélevé. Les points de prélèvement sont préalablement recalés sur le réseau

415hydrographique estimé à partir du MNT IGN 250m, avant de délimiter les aires drainées en amont. Les classes d'aléa érosif
416sont intégrées spatialement par aire drainée en fonction du pourcentage de surface de l'aire drainée affecté par chacune des
417classes (Le Bissonnais et al., 2002). *In fine*, à chaque point de mesure correspond une valeur de MES et une classe d'aléa
418érosif pour chaque saison (printemps, été, automne, hiver). Cependant, sur les 5511 points de prélèvements que comporte
419l'échantillon, seules 4964 valeurs de MES sont exploitées : 547 bassins versants sont en effet classés en zones humides,
420zones de montagne ou zones urbanisées et ne sont donc pas affectés d'une classe d'aléa érosif.

421

422 **Interprétation des résultats**

423Les cartes localisant les classes de qualité MES (Figure 10) montrent en premier lieu que certains secteurs présentent
424systématiquement des valeurs de MES élevées quelle que soit la saison : la zone amont de l'Aude aux environs de
425Carcassonne, la zone aval de l'Aude et sur le Canal de la Robine aux alentours de Narbonne. D'autres secteurs montrent
426par contre une forte composante saisonnière :

- 427 - des valeurs de MES supérieures à 100 mg/l ont été mesurées en aval du Tech en automne et au printemps,
- 428 - des valeurs de MES considérées très mauvaises ont été mesurées en aval du Rhône au printemps, en automne et
429 en hiver,
- 430 - des valeurs de MES considérées médiocres ou très mauvaises ont été prélevées sur le Fresquel au printemps, en
431 été et en automne, et sur l'Hérault en automne et en hiver,
- 432 - des valeurs de MES très mauvaises ont été mesurées sur la Tet au printemps et en hiver.

433Enfin, la confrontation de l'altération de la qualité de l'eau par les MES et des zones d'aléa érosif fort montre une cohérence
434spatiale particulièrement en automne : les mesures de MES élevées en aval du Tech, du Rhône, de l'Orb et en amont de
435l'Aude peuvent être mises en relation avec des bassins versants amont particulièrement sensibles à l'aléa érosif. Ceci se
436vérifie également pour la zone amont de l'Aude au printemps et en hiver. Le régime climatique méditerranéen en est sans
437doute la cause, avec des périodes de pluviométrie fortes principalement en automne et secondairement au printemps (Ifen,
4382003).

439Les analyses statistiques tendent à confirmer ces observations. Les analyses de variance (Tableau 1a et 1c) montrent qu'il
440existe une différence significative entre les moyennes au risque d'erreur de 5%. La comparaison multiple des moyennes
441(Tableau 1b) montre qu'il existe une différence significative entre la moyenne des valeurs de MES en automne et la
442moyenne des valeurs de MES en été. Par contre au printemps et en hiver les moyennes des valeurs de MES prélevées ne
443sont pas significativement différentes de l'été d'une part et de l'automne d'autre part. Les moyennes des valeurs de MES
444prélevées au printemps et en hiver sont également différentes l'une de l'autre.

445Enfin, la comparaison multiple des moyennes (Tableau 1d) montre qu'il existe une différence significative au risque d'erreur
446de 5%, entre la moyenne des valeurs de MES pour les classes d'aléa érosif faible d'une part et très faible, fort et moyen
447d'autre part. Par contre pour les bassins versants amont classés en aléa érosif très fort, la moyenne des MES n'est pas
448significativement différente des deux groupes cités ci-dessus. Le Tableau 1d montre donc qu'il n'existe pas de relation entre
449les moyennes de MES et le classement des bassins versants selon l'aléa érosif.

450Pour conclure quant à l'impact de l'érosion hydrique sur l'altération de la qualité des eaux de surface par les MES, il faudrait
451pouvoir discriminer les apports d'origine agricole des apports industriels ou de ceux imputables à des lâchers de barrage.

452

453L'enjeu viticole

454Le vignoble présente un enjeu agricole et économique important pour la région Languedoc-Roussillon. Avec ses 300.000
455hectares et ses 8 AOC (Appellations d'Origines Contrôlées), il s'agit du plus grand vignoble de France, représentant un tiers
456de la superficie viticole nationale et 30,3% de la SAU de la région Languedoc-Roussillon en 2000 (Ifen, 2003).

457Les dégâts occasionnés dans les vignobles sont essentiellement de trois types : l'arrachement des plants de vignes, la
458création de rigoles et ravines gênant les interventions culturales et le recouvrement des plants par le dépôt des particules
459entraînées par l'érosion. Même si la plaine de l'Hérault est peu sensible à l'érosion car les pentes sont faibles, l'alternance
460de périodes très sèches et de fortes pluies peut générer des signes érosifs localement sur certaines parcelles (Le
461Bissonnais et *al.*, 2002). La redistribution des particules entraînées vers le bas des parcelles pose également le problème
462des contaminations par les fertilisants et éléments polluants adsorbés sur ces particules. La concentration des éléments
463polluants vers le bas des parcelles peut donc entraîner des phénomènes locaux de phytotoxicité.

464La confrontation des zonages d'aptitude AOC (Figure 11a) et de l'aléa érosif (Figure 11b), montre que :

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

473Des vérifications terrain, complétées par l'étude de photos aériennes permettraient de valider ces observations. Enfin, pour
474estimer la vulnérabilité des vignobles, il faudrait concevoir un indicateur qui pourrait combiner l'évolution des superficies et la

475dégradation des sols viticoles. La déprise agricole impacte en effet fortement le territoire viticole : plus de 50 000 ha de
476vignes ont été arrachés durant les trente dernières années et demeurent en friches (Ifen, 2003). La dégradation biologique
477des sols (disparition des micro-organismes et de la faune du sol) induite par l'emploi d'engrais chimiques et de pesticides
478favoriserait quant à elle un dépérissement des vignobles, notamment dans le département de l'Hérault, où un tiers du
479vignoble serait concerné (Ifen, 2003).

480

481DISCUSSION ET PERSPECTIVES

482Modélisation de l'aléa érosif

483Différents types d'investigations sont envisageables pour valider la cartographie de l'aléa érosif modélisé à l'échelle de la
484région Languedoc-Roussillon à partir des données issues du Référentiel Régional Pédologique au 1/250.000.

485La comparaison avec la cartographie obtenue à partir de la BDSol-1M réalisée précédemment (Le Bissonnais et al., 2002) a
486d'ores et déjà permis de vérifier que les zones des différentes classes d'aléa érosif sont globalement géographiquement bien
487positionnées. Si la comparaison pixel à pixel des classes d'aléa montre que 75 % des pixels sont affectés de la même
488classe, on note cependant que l'aléa a tendance à être plus faible lorsqu'il est modélisé à l'aide de BDSol-250. On peut
489cependant raisonnablement concevoir que les données tant au niveau géographique que sémantique sont plus précises
490dans la BDSol-250. Une investigation plus fine devrait permettre de quantifier l'apport des précisions pédologique
491sémantique et géographique de BDSol-250 par rapport à BDSol-1M. Les paramètres de battance et d'érodibilité estimés par
492règles de pédotransfert à partir de la BDSol-1M d'une part et de la BDSol-250 d'autre part, devront également être
493comparés. Enfin, le poids des précisions géographiques et sémantiques pourra être analysé selon différentes combinaisons.
494Le poids des règles de pédotransfert pourra être étudié en appliquant les règles établies pour la BDSol-1M à la BDSol-250.
495A l'inverse, les règles de pédotransfert établies pour la BDSol-250 ne peuvent pas être appliquées à la BDSol-1M car la
496précision sémantique de cette dernière n'est pas suffisante.

497Une analyse de sensibilité du modèle permettrait quant à elle d'analyser le poids des différents paramètres d'entrée du
498modèle et de les hiérarchiser. De futures validations terrain devraient également venir en appui de ces investigations, pour
499réajuster les règles de pédotransfert spécifiques au contexte méditerranéen et établies pour la BDSol-250.

500

501Confrontation aux enjeux

502L'établissement d'un indicateur « enjeu urbain » a permis de dépasser le concept d'aléa décrivant la probabilité d'occurrence
503d'un phénomène érosif en un point donné. Concernant l'enjeu « qualité de l'eau » et l'enjeu viticole, les indicateurs
504développés mériteraient d'être étayés. L'indicateur de qualité des eaux superficielles pourrait par exemple être complété par

505 les valeurs de turbidité mesurées sur les points d'AEP (Alimentation en Eau Potable – données DRASS) ou les mesures de
506 phosphore du RNB (Réseau National de Bassin) à l'origine de l'eutrophisation des cours d'eau.

507 Pour approcher la notion de risque, il faudrait poursuivre cette étude en intégrant les politiques de prévention mises en
508 œuvre pour limiter la vulnérabilité des trois enjeux majeurs décrits ci-dessus. L'analyse de la « mitigation », ou mise en
509 œuvre de mesures destinées à réduire les dommages associés à des risques naturels ou générés par les activités
510 humaines, permettrait ainsi d'intégrer tous les facteurs du risque érosion tels que décrit dans le modèle DPSIR (driving
511 forces — pressures — state — impact — responses) ou FPEIR (forces motrices — pressions — état — impact — réponses)
512 (Van Camp *et al.*, EUR 21319 EN/2 2004). Ce modèle développé par l'Agence Européenne pour l'Environnement, vise à
513 décrire les interactions entre la société et l'environnement à l'aide d'indicateurs et de statistiques diverses. Notre étude
514 pourrait ainsi être enrichie des mesures préventives - le volet « réponses » du modèle DPSIR – par l'intégration des zonages
515 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
516 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels. Il en va de même pour l'analyse des politiques de
517 gestion de l'eau mises en place localement dans le cadre des SDAGE, des contrats de nappe, ... Enfin, l'étude de
518 l'application des recommandations agricoles visant à diminuer les phénomènes érosifs et de phytotoxicité en zones viticoles
519 (enherbement des inter-rangs, épandage de compost,...) permettrait de mesurer les résultats de la gestion
520 environnementale des zones viticoles.

521

522 CONCLUSIONS

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

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

535 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
536 sont localisés aux environs de Carcassonne et de Montpellier, les vignobles localisés en plaine littorale étant moins
537 sensibles.

538 Des investigations complémentaires pourront se baser sur ces premiers résultats, pour évaluer le poids des paramètres
539 pédologiques introduits dans le modèle et le poids des précisions sémantiques et géographiques des bases de données
540 pédologiques utilisées. Ceci permettra de conclure quant à l'apport d'un Référentiel Régional Pédologique à l'échelle du
541 1/250.000 dans la précision de la spatialisation de l'aléa érosif. Les indicateurs d'enjeu pourront quant à eux être améliorés
542 et nuancés, notamment par la prise en compte des politiques de prévention de l'érosion dans les zones de départ et les
543 politiques visant à limiter les dommages induits par le risque érosion.

544

545 REMERCIEMENTS

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

549

550 BIBLIOGRAPHIE

- 551 Cerdà A., 2001 - Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52, 59-68.
- 552 COM(2002) 179 final, 2002 - Communication de la commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social et au comité des
553 régions : Vers une stratégie thématique pour la protection des sols. Commission des Communautés Européennes, 39p.
- 554 Daroussin J. et King D., 1996 - A pedotransfer rules database to interpret the soil Geographical Database of Europe for environmental purposes. In: The use
555 of pedotransfer in soil hydrology research in Europe. Workshop proceedings. Orléans, France. 10-12 octobre 1996, pp. 25-40.
- 556 Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin JCl., Fort JL., Falipou P., Arrouays D., 2004 - Le système
557 d'information national sur les sols : DONESOL et les outils associés. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 11, 3, 2004 – pp. 255 à 269.
- 558 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
559 n°101.
- 560 IFEN, 2003 - L'environnement en Languedoc-Roussillon. Coll. Les cahiers régionaux de l'environnement – Ifen. 168 p.
- 561 INSEE, 2005 - Population par région aux derniers recensements (population sans doubles comptes). Disponible sous
562 http://www.insee.fr/fr/insee_regions/languedoc/rfc/chifcle_fiche.asp?nat=1&ref_id=CMRSOS02137&tab_id=470 (vérifié le 24 avril 2006).
- 563 INSEE modèle OMPHALE 2000, 2005 - Projection de population pour le Languedoc-Roussillon et ses départements. Disponible sous
564 http://www.insee.fr/fr/insee_regions/languedoc/rfc/chifcle_fiche.asp?ref_id=POPOP004&tab_id=1349 (vérifié le 24 avril 2006).
- 565 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-
566 172.
- 567 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.

- 568 INRA SESPCF – Conseil Régional de la Région Nord-Pas-de-Calais, 208 p.
- 569 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.
- 570 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.
- 571 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 No. 1 (2005) pp.1-15.
- 573 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
- 576 Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King, D., 2002 - Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena* 46 (2002) 207-220.
- 578 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.
- 579 Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 2002 - L'érosion hydrique des sols en France. *INRA Orléans - IFEN* 108 p.
- 581 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.
- 582 Météo France, 2006 - Disponible sous <http://www.meteofrance.com/FR/climat/france.jsp> (vérifié le 20 avril 2005).
- 583 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 10 avril 2005).
- 584 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 avril 2006).
- 586 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 : 333-343.
- 588 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, 275-305.
- 590 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.
- 592 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.
- 594 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.
- 596 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.
- 599 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. 47p.
- 602 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, 229-250.
- 604 Veyret Y. et Reghezza M., 2005 - Aléas et risques dans l'analyse géographique. *Annales des Mines*, octobre 2005, n°40, pp. 61-69.

606Vrieling A., 2006 - Satellite remote sensing for water erosion assessment : A review. Catena 65, pp. 2-18.

607Wischmeier, W. H., Mannering J. V., 1969. Relation of soil properties to its erodibility. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 33, 131-137.

608
609
610
611
612
613
614

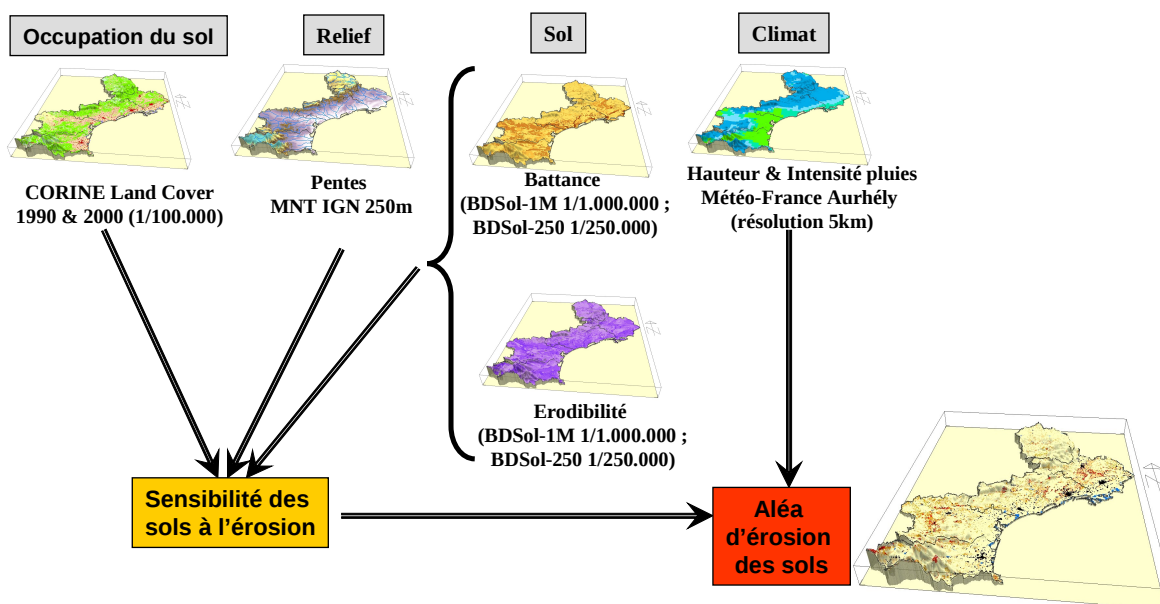
615**Figure 1** - Présentation du modèle et des informations géographiques utilisés pour estimer et cartographier l'aléa érosif des

616sols en région Languedoc-Roussillon.

617**Figure 1** - Presentation of the model and the geographical informations used to estimate and map the soil erosion risk for

618the Languedoc-Roussillon region.

619
620

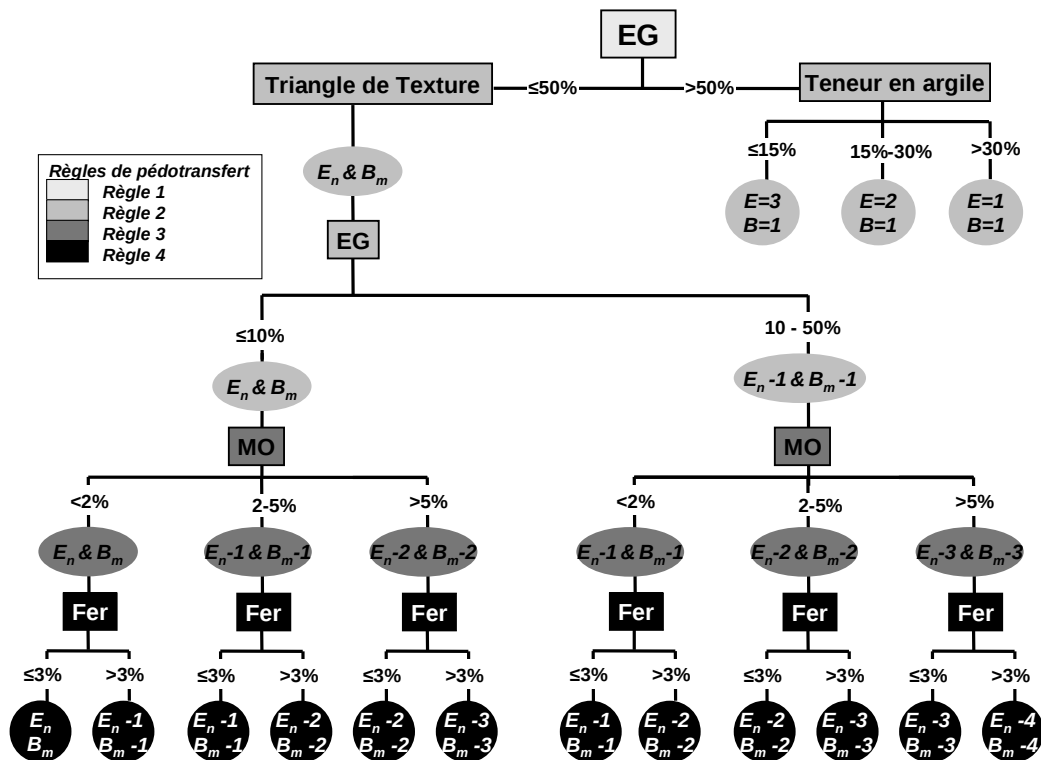


621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636

637
638
639
640
641
642
643
644
645
646

647 **Figure 2** - Organigramme des règles de pédotransfert permettant d'obtenir les valeurs des classes de battance et
648 d'érodibilité à partir de la combinaison des informations relatives à la teneur en éléments grossiers, à la texture, à la teneur
649 en matière organique et en fer. EG = abondance des éléments grossiers en %, E_n = classe de sensibilité à l'érosion issue du
650 triangle d'érodibilité, B_m = classe de sensibilité à l'érosion issue du triangle de battance, MO = abondance de la matière
651 organique en %.

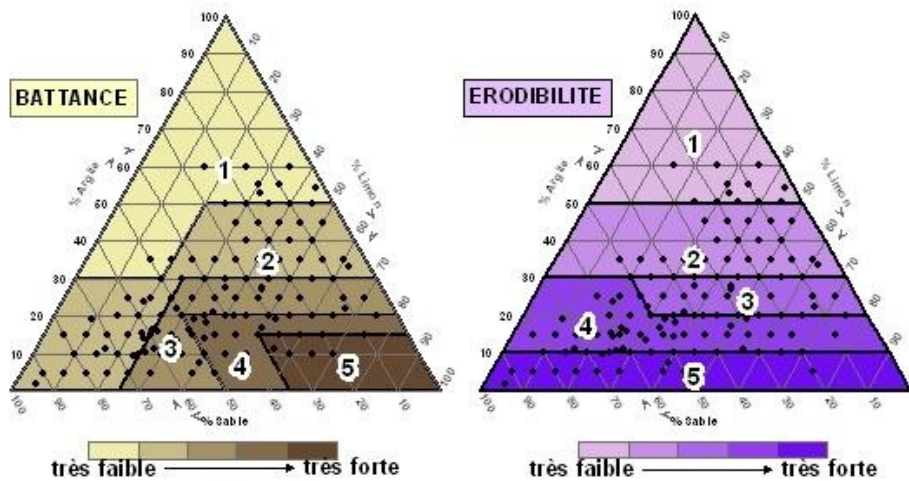
652 **Figure 2** - Complete flow diagram of the rules of pedotransfer allowing to obtain the values of crusting and erodibility
653 classes obtained starting from the combination of the coarse element content, the texture, the organic matter and iron
654 content. EG = coarse element content in %, E_n = sensitivity class to soil erodibility resulting from the erodibility triangle, B_m =
655 sensitivity to soil crusting resulting from the crusting triangle, MO = organic matter rate in %.



656
657

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

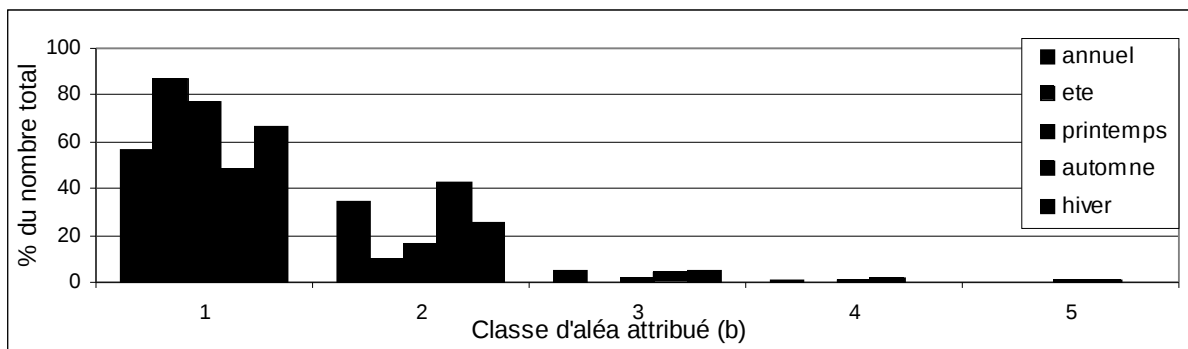
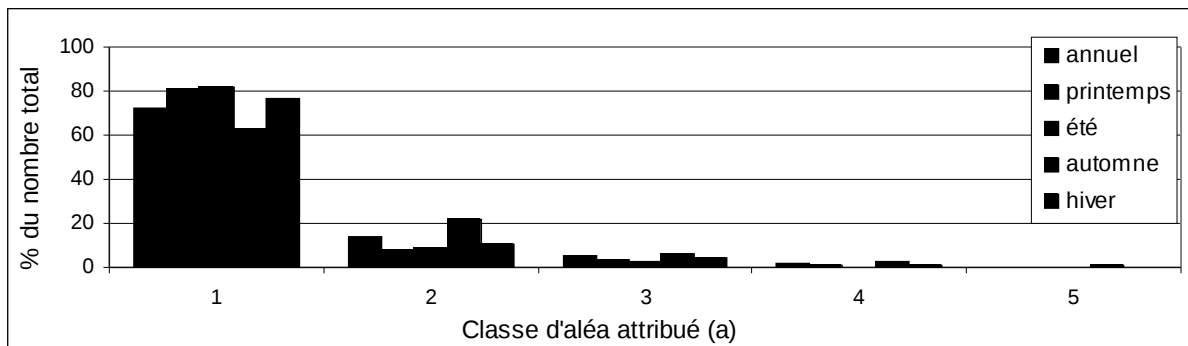
661 **Figure 3** - Rule 2: pedotransfer rule specific to the Languedoc-Roussillon region allowing the conversion of strata textural
662 data to crusting and erodibility classes through projection into texture triangles split into 5 sensitivity classes: 1 = very low,
663 2 = low, 3 = medium, 4 = high, 5 = very high.



664

665 **Figure 4** – Histogramme des fréquences de chaque classe d'aléa érosif annuel et saisonnier : aléa par pixel (a), aléa intégré
 666 par bassin versant RNDE (b). Les saisons : printemps (mars à mai), été (juin à août), automne (septembre à novembre),
 667 hiver (décembre à février).

668 **Figure 4** – Histogram of annual and seasonal erosion risk frequency: risk (a), risk integrated by RNDE water catchment (b).
 669 The seasons: spring (from March to May), summer (from June to August), autumn (from September to November), winter
 670 (from December to February).



672

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

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

679

680(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 | | | |

681

682(b)

| Modalités | Moyenne | Regroupements | | |
|-----------|---------|---------------|--|--|
| Eté | 12.757 | A | | |
| Printemps | 14.294 | A B | | |
| Hiver | 19.359 | B C | | |
| Automne | 20.733 | C | | |

683

684(c)

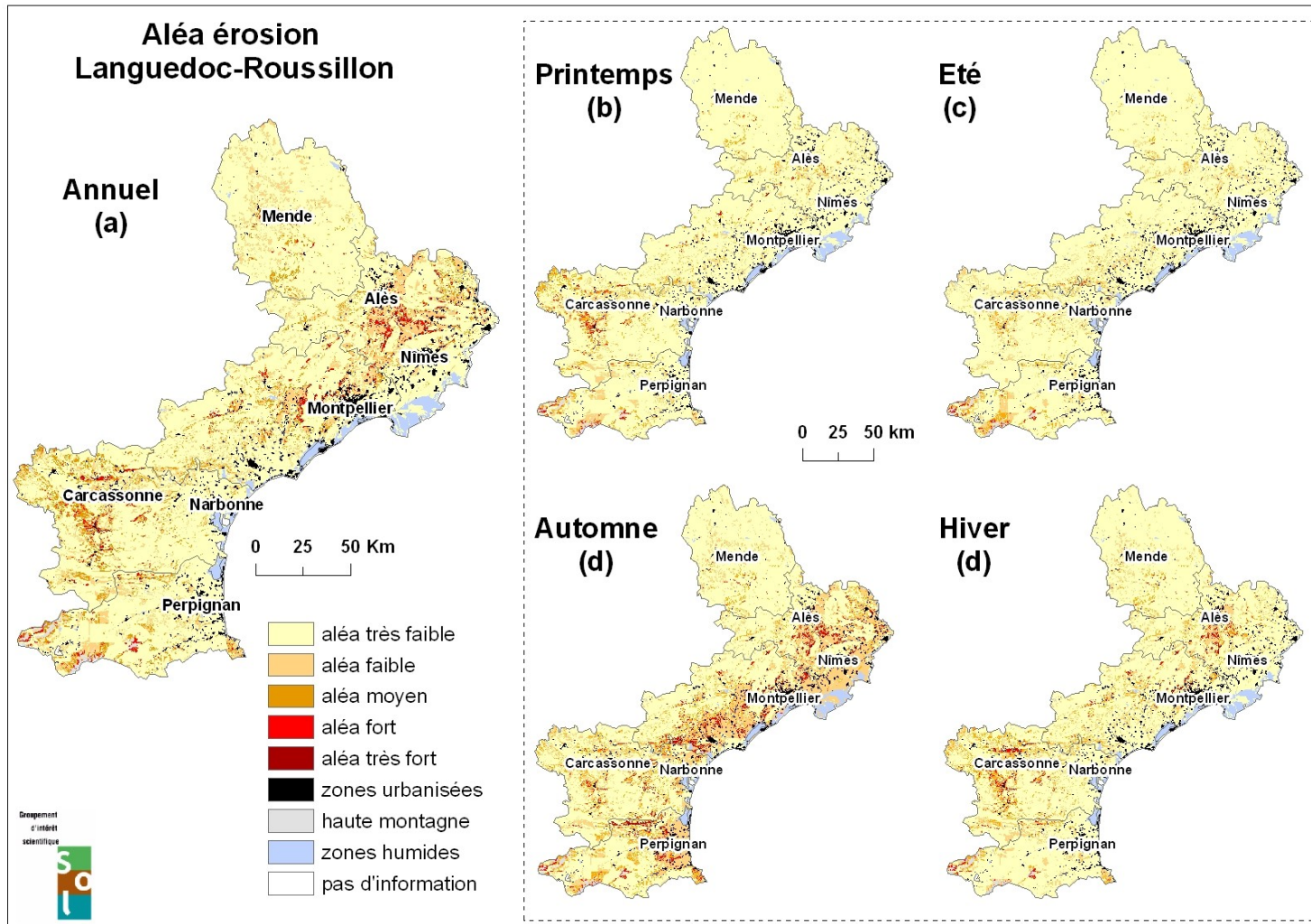
| Source | ddl | Somme des carrés | Carré moyen | F de Fisher | Pr > F |
|---------|------|------------------|-------------|-------------|----------|
| Modèle | 4 | 91019.617 | 22754.904 | 5.918 | < 0.0001 |
| Résidus | 4959 | 19066364.551 | 3844.800 | | |
| Total | 4963 | 0.000 | | | |

685

686(d)

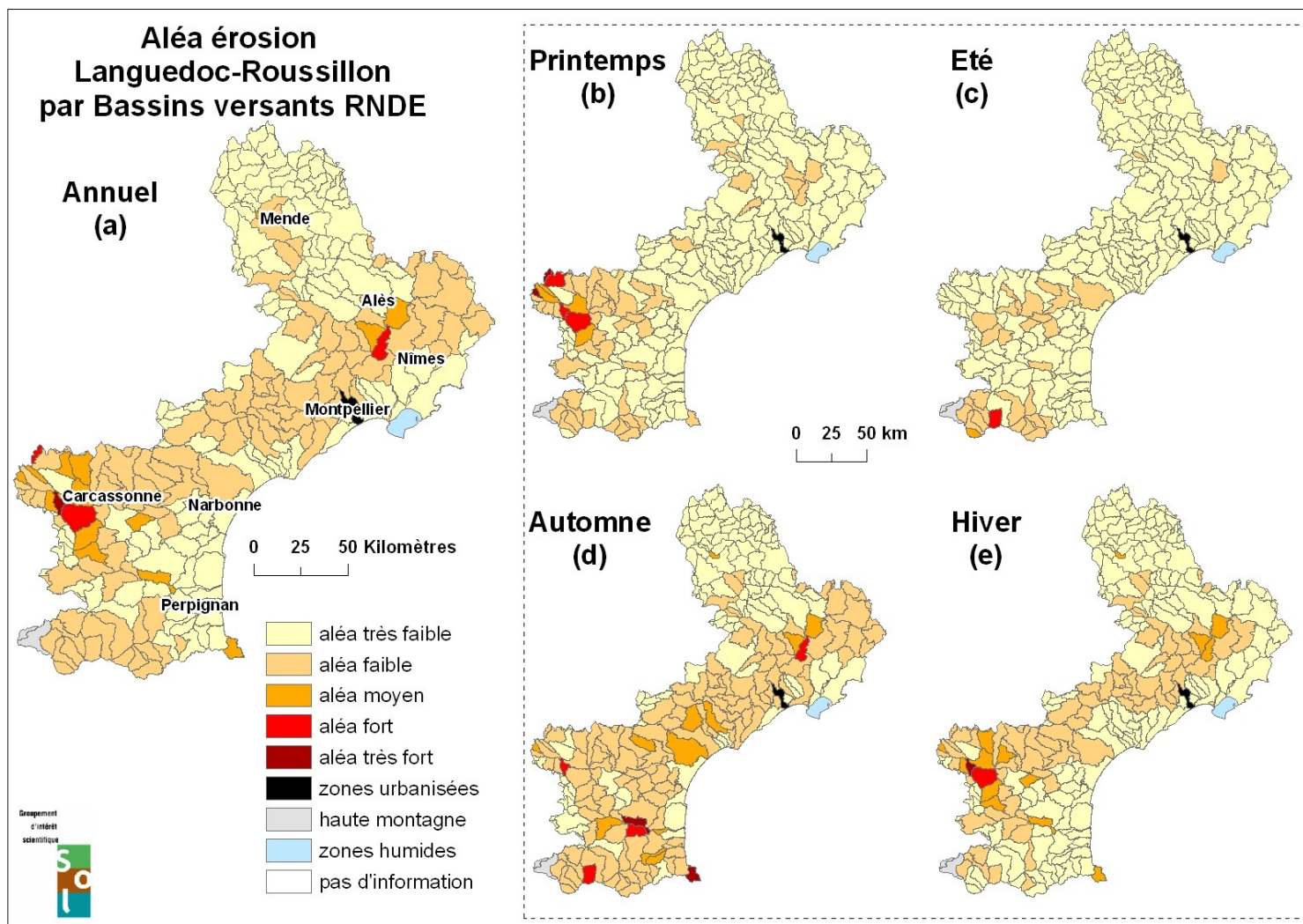
| Modalités | Moyenne | Regroupements | | |
|------------------|---------|---------------|--|--|
| Aléa faible | 10.547 | A | | |
| Aléa très fort | 17.058 | A B | | |
| Aléa très faible | 18.737 | B | | |
| Aléa fort | 19.135 | B | | |
| Aléa moyen | 22.144 | B | | |

687 **Figure 5** - Cartes résultant de la modélisation de l'aléa érosif au 1/250.000 : annuel (a), printemps (b), été (c), automne (d), hiver (e). Les données sont présentées par pixel de 250 x 250m.
 688 **Figure 5** - Maps resulting from the modelling of the soil erosion risk on a 1:1250,000 scale: annual (a), spring (b), summer (c), autumn (d), winter (e). Data are integrated by 250 x 250m cells.



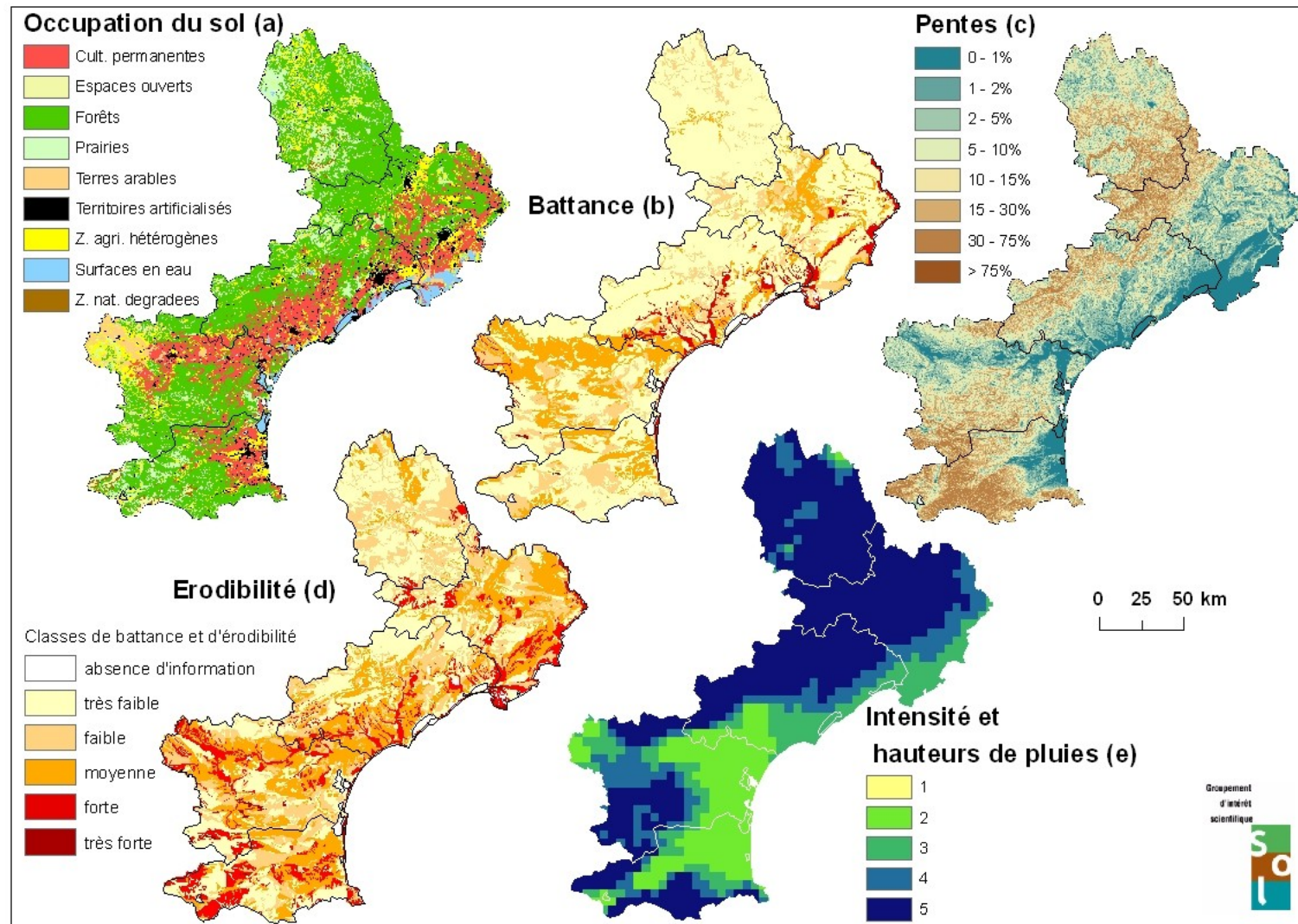
691 **Figure 6** - Cartes résultant de la modélisation de l'aléa érosif au 1/250.000 : annuel (a), printemps (b), été (c), automne (d), hiver (e). Les données ont été intégrées par USI (Unités Spatiales 692 d'Intégration), en l'occurrence par bassins versants RNDE (Réseau National des Données sur l'Eau).

693 **Figure 6** - Maps resulting from the modelling of the soil erosion risk on a 1:1250,000 scale: annual (a), spring (b), summer (c), autumn (d), winter (e). Data are integrated by SIU (Spatial 694 Integration Unit), the RNDE (Water Data National Network) watersheds.

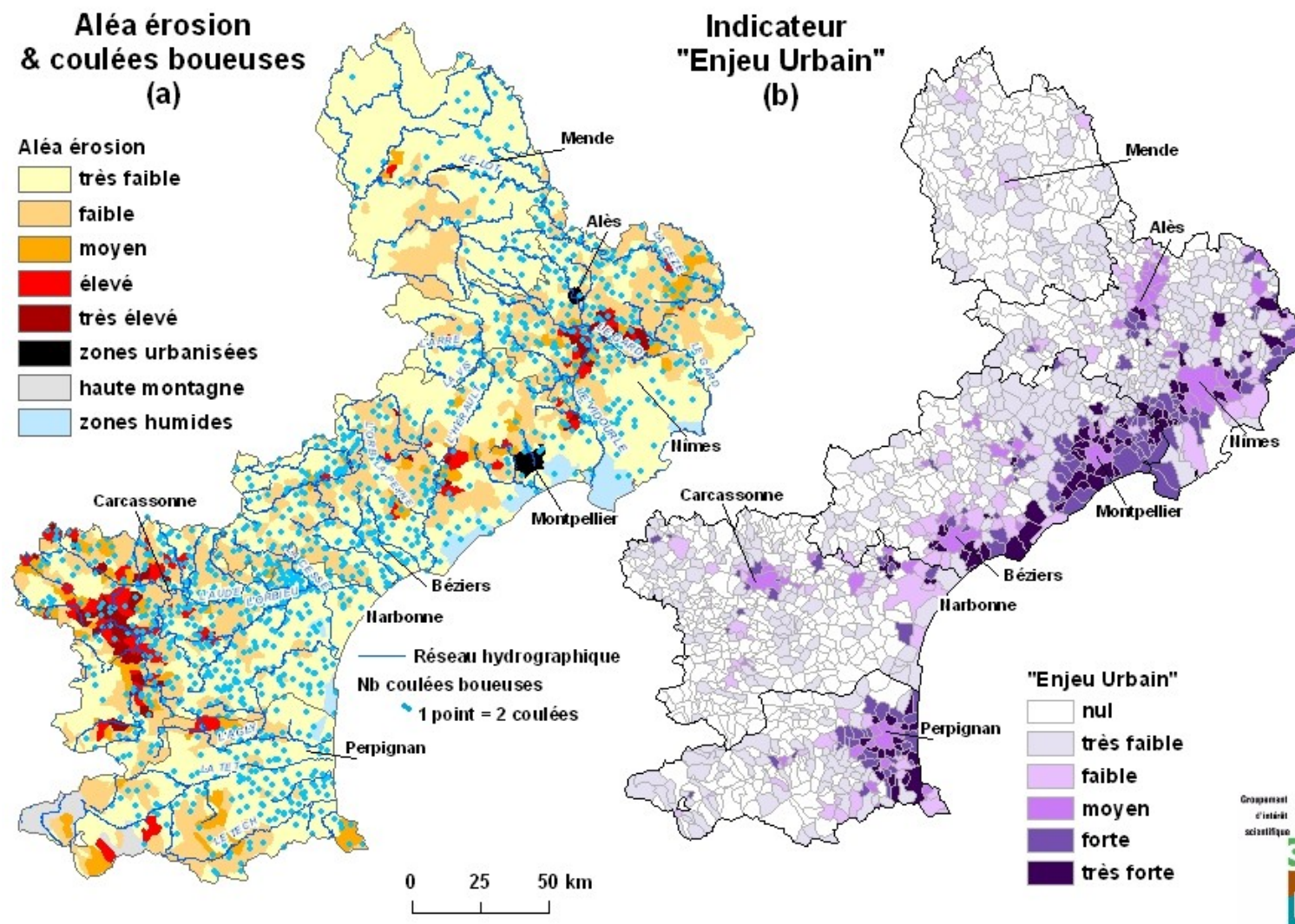


696 **Figure 7** – Cartes sources entrées dans le modèle d'estimation de l'aléa érosif pour la région Languedoc-Roussillon : occupation du sol (a), battance (b), pentes (c), érodibilité (d) et agressivité
 697 des pluies (e).

698 **Figure 7** – *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).*



700 **Figure 8** - Cartes de l'aléa érosif intégré par commune et du nombre de coulées boueuses par commune (a) et carte représentant « l'enjeu urbain » par communes (b).
 701 **Figure 8** - Maps of the soil erosion risk integrated by municipalities and the number of mudflows by municipalities (a) and map of the soil sealing by municipalities (b).



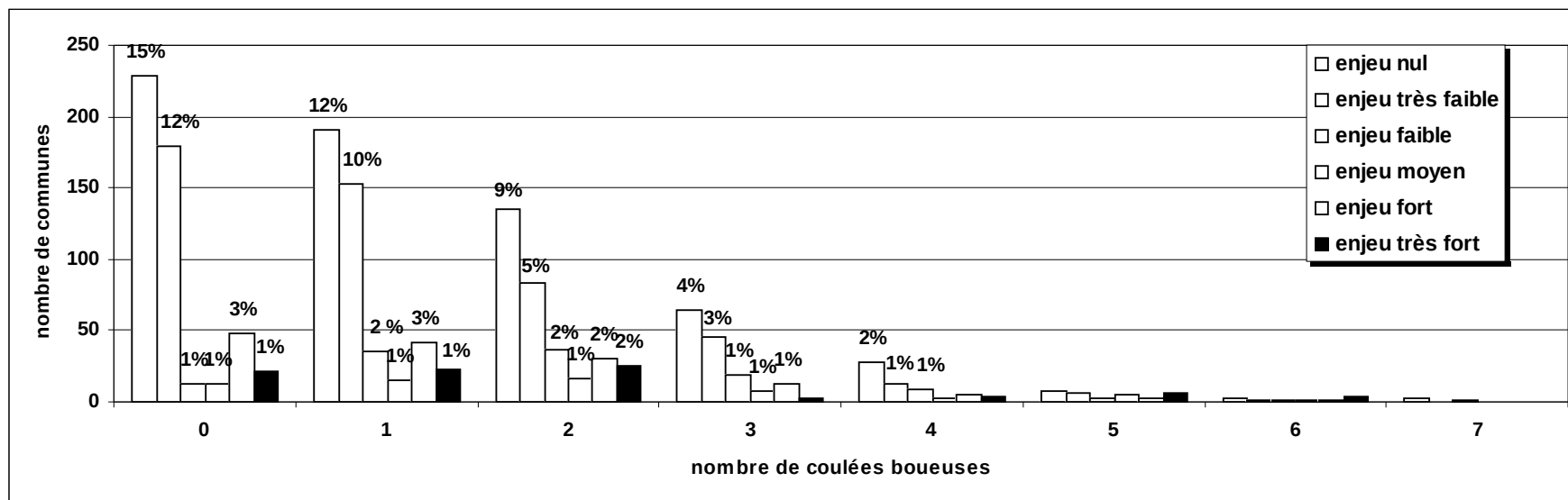
703 **Figure 9** – Tableau de définition de l'indicateur « enjeu urbain » (a) et histogramme de sa distribution en fonction du nombre de coulées boueuses pour les 1545 communes de la région
 704 Languedoc-Roussillon (b).

705 **Figure 9** – Table defining the “urban stake” indicator (a) and histogram of its distribution according to the number of mudflows for each of the 1545 communes of the Languedoc-Roussillon
 706 region (b).

707(a)

| Densité population en 1999 > 80 hab./km ² | Evolution population 1990-1999 > 8.5 % | Evolution artificialisation 1990-2000 > 4.8% | Nombre communes | Communes (en %) | Indicateur "Enjeu Urbain" |
|--|--|--|-----------------|-----------------|---------------------------|
| | | | 660 | 42.7 | 0 nulle |
| | ☑ | | 481 | 31.1 | 1 très faible |
| | ☑ | ☑ | 1 | 0.1 | 2 faible |
| ☑ | | | 116 | 7.5 | 2 faible |
| ☑ | | ☑ | 60 | 3.9 | 3 moyenne |
| ☑ | ☑ | | 141 | 9.1 | 4 forte |
| ☑ | ☑ | ☑ | 86 | 5.6 | 5 très forte |
| | | | 1545 | 100.0 | |

708 (b)



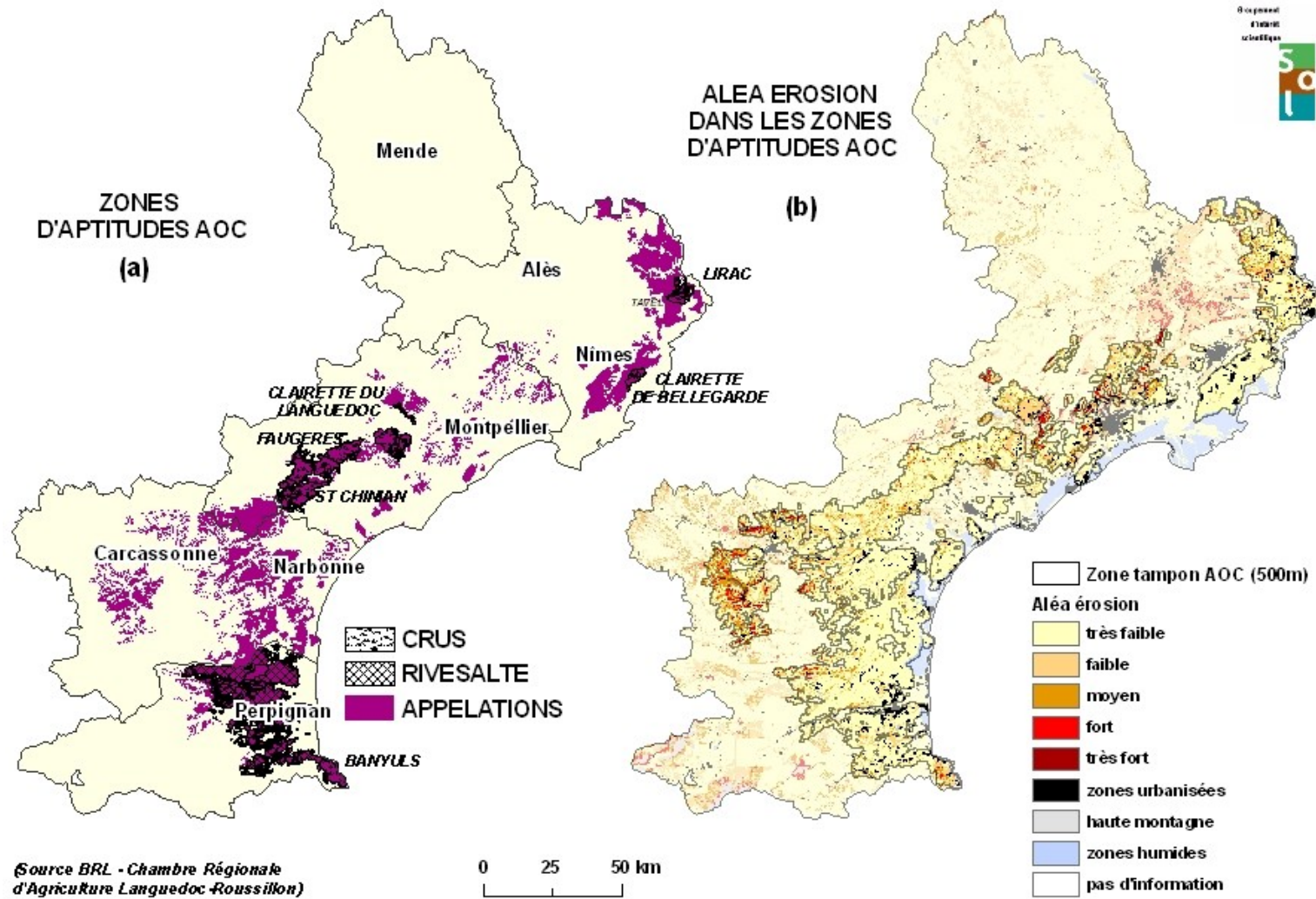
709

716 **Figure 11** - Carte des zones d'aptitude viticoles AOC (a) et carte de l'aléa érosif dans ces zones (b).

717 **Figure 11** - Map of the AOC wine aptitude (a) and map of soil erosion risk in these zones (b).

718

719



720