



HAL
open science

Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif.

Anne Colmar, Christian Walter, Yves Le Bissonnais, Joël Daroussin

► To cite this version:

Anne Colmar, Christian Walter, Yves Le Bissonnais, Joël Daroussin. Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif.. Étude et Gestion des Sols, 2010, 17 (1), pp.19-32. hal-00729671

HAL Id: hal-00729671

<https://institut-agro-rennes-angers.hal.science/hal-00729671>

Submitted on 6 Mar 2013

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.

Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif

A. Colmar⁽¹⁾, C. Walter⁽¹⁾, Y. Le Bissonnais⁽²⁾ et J. Daroussin

- 1) INRA - Agrocampus Ouest, UMR 1069 SAS, 65 route de Saint Briec - FR 35042 Rennes, christian.walter@agrocampus-ouest.fr
- 2) INRA - Supagro-IRD Montpellier, UMR LISAH, 2 place Pierre Viala, FR 34060 Montpellier
- 3) INRA - Unité de Science du Sol, 2163 avenue de la Pomme de Pin, CS 40001, 45075 Orléans Cédex

RÉSUMÉ

Des estimations de l'aléa d'érosion ont été réalisées à l'échelle européenne notamment par le programme PESERA (Kirkby *et al.*, 2003), ainsi qu'à l'échelle nationale grâce à un modèle cartographique nommé MESALES (Le Bissonnais *et al.*, 1998; Le Bissonnais *et al.*, 2002). Ce modèle intègre les paramètres de l'érosion (occupation du sol, battance, pente, érodibilité et climat) selon un arbre logique qui hiérarchise et pondère les classes de ces paramètres.

Le travail mené porte sur l'évaluation de l'aléa érosif en Bretagne (Colmar, 2006). Son objectif est de valider, à l'échelle régionale et par avis d'experts, la carte d'évaluation de l'aléa érosif issue de l'application à l'échelle nationale du modèle MESALES (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Des entretiens avec des experts pédologues et des conseillers agricoles de la région ont permis de délimiter les zones sur- ou sous-estimées par le modèle et de proposer des améliorations des données d'entrée. D'après les avis d'expert, l'aléa érosif prédit par le modèle est sous-estimé dans la partie est de la région et diffère de leur expertise dans d'autres secteurs. Dans un second temps, les résolutions spatiales des données d'entrée du modèle ont été améliorées, induisant une modification significative des aléas prédits. Une nouvelle carte d'évaluation de l'aléa érosif de la région est proposée, correspondant mieux aux avis d'expert.

Mots clés

Aléa érosif, sol, érosion, Bretagne, arbre de décision, expertise, Système d'Information Géographique, MESALES

SUMMARY**VALIDATION BY LOCAL EXPERTS OF THE MESALES REGIONAL SOIL EROSION RISK ASSESSMENT**

Erosion risk has been estimated at the European level through the PESERA program (Kirkby et al., 2003), as well as at the national level with the help of a cartographic model referred here as the MESALES model (Le Bissonnais et al., 1998; Le Bissonnais et al., 2002). The latter model integrates the erosion parameters (land use, crusting, slope, erodibility and climate) into a decision tree which forms a hierarchy of the input factors and weights their classes. The objective of the present work was to call upon expert knowledge to validate, at the regional scale of Brittany (NW France), the erosion risk evaluation map derived from the MESALES model at the national scale (Colmar, 2006). Interviews with soil experts and farming consultants allowed to delineate areas over- or underestimated by the national scale model and to suggest improvements of the input data. As to their analysis the erosion risk predicted by the model is underestimated in the eastern part of the region and does not match with their expertise in some other areas. In a second step we increased the spatial and/or temporal resolution of the topographic and the land use data. Both methods improved the results and we were able to produce a new regional map of erosion risk for Brittany.

Key-words

Erosion risk, erosion, Brittany, decision tree model, validation by local experts, erosion factors, Geographical Information System, MESALES

RESUMEN**ENFOQUE DE VALIDACIÓN REGIONAL, POR RECOMENDACIONES DE EXPERTOS, DEL MODELO MESALES DE ESTIMACIÓN DEL RIESGO EROSIVO**

Se realizaron estimaciones del riesgo de erosión a escala europea en particular por el programa PESEA (Kirby et al, 2003) así que a escala nacional gracias a un modelo cartográfico llamado MESALES (Le Bissonnais et al, 1998; Le Bissonnais et al, 2002). Este modelo integra los parámetros de la erosión (uso del suelo, batidez, pendiente, erodibilidad y clima) según un árbol lógico que jerarquiza y pondera las clases de estos parámetros.

El trabajo hecho lleva sobre la evaluación del riesgo erosivo en Bretaña (Colmar, 2006). Su objetivo está validar a escala regional y por recomendaciones de expertos, el mapa de evaluación del riesgo erosivo que viene de la aplicación a escala nacional del modelo MESALES (Le Bissonnais et al, 2002). Discusiones con expertos edafólogos y consejeros agrícolas de la región permitieron delimitar las zonas sobre- o sub-estimadas por el modelo y proponer mejoramientos de los datos de entrada. Según las recomendaciones de los expertos, el riesgo erosivo predicho por el modelo está sub-estimado en la parte Este de la región y difiere de su peritación en otros sectores. En un segundo tiempo, se mejoraron las resoluciones espaciales de los datos de entrada, lo que induce una modificación significativa de los riesgos predichos. Se propone un nuevo mapa de evaluación del riesgo erosivo de la región que corresponde mejor a las recomendaciones de los expertos.

Palabras clave

Riesgo erosivo, Bretaña, árboles de decisión, sistemas de informaciones geográficas, MESALES

Le sol étant une ressource naturelle peu renouvelable, les dégradations causées par le ruissellement, en emportant les éléments fertiles du sol ou en creusant de profondes ravines, revêtent un caractère quasi-irréversible. Outre les dégâts aux terres agricoles, l'érosion entraîne une dégradation de la qualité des eaux aussi bien superficielles que souterraines (Gruau *et al.*, 2004). La redistribution et la perte en terre dans les champs, la perte de structure des sols ainsi que la diminution du taux de matières organiques et de nutriments aboutissent à une diminution de la profondeur des terres cultivables ainsi qu'au déclin de leur fertilité. Le transport de sédiments réduit la capacité des rivières et des lacs bassins de rétention, augmente le risque d'inondation et de coulées de boues et accroît la concentration en azote et en phosphore des cours d'eau.

La Commission Européenne a identifié en 2002 la réduction de l'érosion des sols comme étant une priorité des politiques environnementales et agricoles (COM 179 final, 2002). Le décret n° 2007-882 du 14 mai 2007 (J.O. du 15 mai), relatif à certaines zones soumises à contraintes environnementales et modifiant le code rural, impose aux régions de délimiter les zones les plus sensibles à l'érosion. Des programmes d'actions fondés sur ce zonage doivent être mis en place dans le but de réduire l'érosion ainsi que ses effets.

Plusieurs modèles ont été développés pour estimer un aléa érosif sur de grandes surfaces. On peut citer par exemple le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier *et Smith*, 1978) initialement conçu aux Etats-Unis d'Amérique à partir de données recueillies en 1950 à l'échelle parcellaire, puis adapté à l'échelle régionale. Un modèle, aujourd'hui nommé MESALES pour « Modèle d'Estimation Spatiale de l'Aléa Erosion des Sols » (Le Bissonnais *et al.* 2002, Dubreuil *et al.*, 2003), a été développé en France dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut Français de l'Environnement (IFEN) et l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Une approche de modélisation a été conduite à l'échelle européenne sous l'acronyme PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment) (Kirkby *et al.*, 2003). Ces modèles combinent toujours des données d'entrée qui sont des déterminants supposés de l'érosion pour établir un classement des situations. L'approche PESERA a été mise en œuvre à l'échelle européenne à la résolution de 1 km alors que le modèle MESALES a été développé pour la France à la résolution de 250 m (Veillefont, 2003), puis à la résolution de 50 m pour plusieurs départements (Hérault, Oise) ou régions (Alsace, Haute-Normandie, Languedoc-Roussillon) (Desprats *et al.*, 2006; Surdy *et al.*, 2006)

La validation de ces zonages de l'aléa d'érosion est une étape essentielle: le projet de directive européenne sur la protection des sols (COM(2006) 232) impose qu'elle soit faite en mobilisant des sources d'information différentes de celles qui ont permis la construction des modèles.

Plusieurs rapports ont été publiés concernant la validation des trois modèles de calcul de l'érosion (USLE, MESALES et

PESERA) à l'échelle de l'Italie (Van Rompaey *et al.*, 2003b), à l'échelle française (Cerdan *et al.*, 2006) et à l'échelle européenne (Van Rompaey *et al.*, 2003a; Veillefont, 2003; Licciardello *et al.*, 2009). Plusieurs méthodes de validation ont été testées: (i) la comparaison à des mesures de dépôts sédimentaires à l'exutoire de bassins de rétention (Van Rompaey *et al.*, 2003a); (ii) la comparaison à des déclarations de coulées de boues (Antoni *et al.*, 2006); et (iii) la surveillance de la charge de sédiments dans les fleuves (Antoni *et al.*, 2006). D'autres méthodes de validation sont envisageables, telles que la mesure des flux érosifs à l'échelle de la parcelle (Licciardello *et al.*, 2009) ou l'estimation d'une intensité d'érosion moyenne par analyse de l'activité du Cs137. Mais elles correspondent à des mesures trop locales pour être intégrées dans une démarche de validation à l'échelle régionale.

Les tentatives de validation mettant en œuvre une comparaison des zones d'aléa d'érosion avec des mesures de terrain se sont avérées peu efficaces. Par exemple, Van Rompaey *et al.* (2003b) cherchent à prédire, à l'échelle de l'Italie, un taux de sédimentation dans 20 lacs en se fondant sur une carte de l'aléa érosif avec une résolution de 75 m. Ils montrent que l'erreur relative de prédiction est de l'ordre de 70 % et que l'aléa érosif explique peu la variabilité des taux de sédimentation. La confrontation de l'aléa érosif aux déclarations officielles de coulées de boues est une autre démarche de validation déjà envisagée sur la France entière (Le Bissonnais *et al.*, 2002). La *figure 1* illustre ce type de validation en l'appliquant à la région Bretagne sur la période 1983-2005: elle relie statistiquement le nombre de déclarations de coulées de boues en Bretagne à un indice moyen d'aléa érosif par commune issu du modèle MESALES (Colmar, 2006). Même si on observe une corrélation positive entre ces deux paramètres, il apparaît une très grande dispersion des valeurs, en particulier pour les situations avec un nombre de coulées de boues élevé.

Les raisons de ces difficultés de validation sont de deux ordres: (i) les modèles d'estimation ont en eux-mêmes un degré d'incertitude (pertinence du modèle, qualité des données d'entrée); (ii) les données de validation ne reflètent pas de façon fiable l'intensité des phénomènes érosifs. Par exemple, tous les sédiments érodés n'atteignent pas les exutoires ou les retenues d'eau et peuvent être piégés dans des situations intermédiaires, ou alors, les déclarations de coulées de boue ne recensent que principalement des événements érosifs qui créent des dégâts aux infrastructures et dépendent donc de la densité d'habitat. Des méthodes alternatives et indirectes de validation doivent donc être développées.

Une des possibilités est de mobiliser des experts (pédologues, géographes, agronomes, aménageurs, etc.) ayant, de par leur activité professionnelle, une longue expérience de terrain qui leur permet de comparer des situations locales et d'intégrer dans le temps des manifestations d'érosion d'intensité variable. Leur mise à contribution pour valider des zonages érosifs est donc *a priori* intéressante. Elle se heurte néanmoins à plusieurs difficultés potentielles: une zone d'expertise qui se limite, pour chaque

Figure 1 -Statistiques (médiane, quartiles, extrêmes) du nombre de dates où des coulées de boues ont été déclarées dans la base de données GASPARD (MEEDDM, 2006) entre 1983 et 2005 en fonction des différentes classes d'aléa érosif intégrés par commune.

Figure 1 - Statistics (median, quartiles, range) of the number of mudslide events registered in the GASPARD (MEEDDM, 2006) database between 1983 and 2005 as a function of erosion hazard classes integrated by commune.

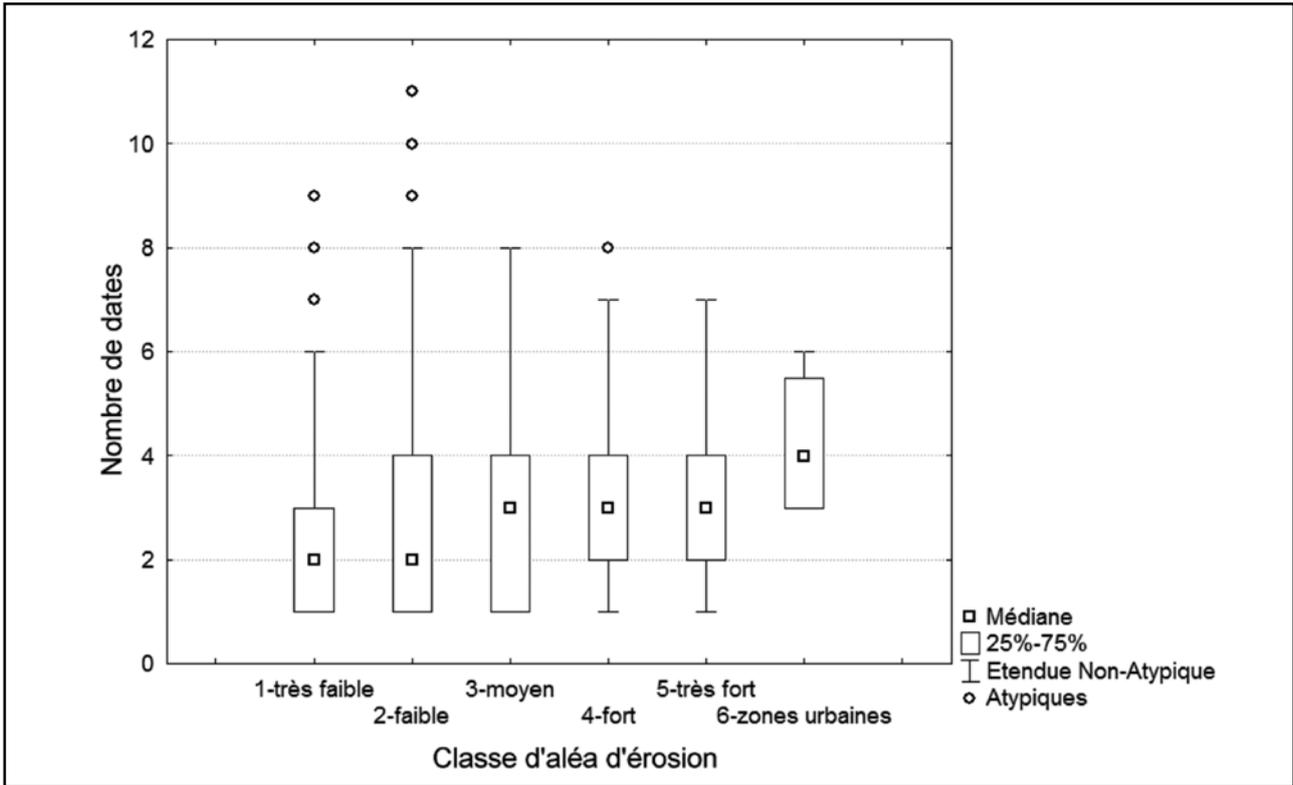
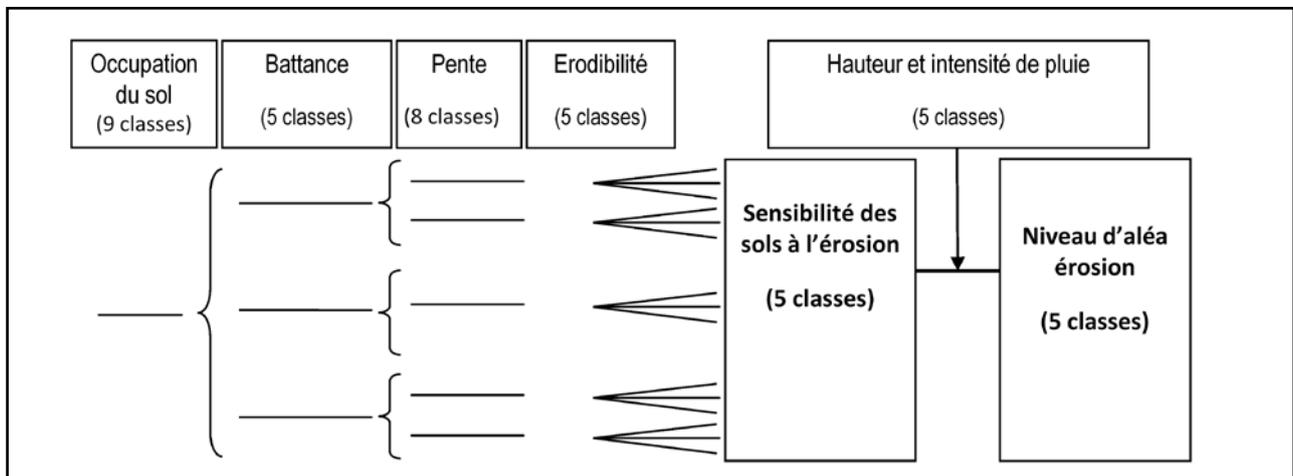


Figure 2 - Vue schématique de l'arborescence logique du modèle MESALES d'estimation de l'aléa d'érosion des sols (d'après Van Rompaey et al., 2003a).

Figure 2 - Schematic view of the MESALES model decision tree for soil erosion risk estimation (from Van Rompaey et al., 2003a).



expert, à un certain secteur sans couvrir l'ensemble de la région ; une appréhension variable et qualitative de l'intensité des processus d'érosion selon la formation des experts, leur expérience et leurs centres d'intérêts, et plus généralement la subjectivité inhérente à ce type d'expertise.

Les objectifs de notre étude sont donc de trois ordres :

- développer une méthode d'intégration des avis d'expert dans une démarche de validation formalisée d'un zonage d'aléa érosif ;
- appliquer cette méthode dans un cas précis qui est celui de la région Bretagne en France pour en tester l'efficacité et les limites ;
- produire de nouvelles cartes de l'aléa d'érosion par l'amélioration des données d'entrées.

ESTIMATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE MESALES

Le modèle MESALES utilise une méthode de croisement de paramètres sous forme de **combinaisons logiques**. A chaque combinaison est affectée une classe de sensibilité à l'érosion des sols. Les paramètres sont hiérarchisés et pondérés à partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs. Le **modèle est qualitatif**, puisqu'il est établi à partir de connaissances d'experts. Il est représenté sous la forme d'une **arborescence logique** (figure 2) où chaque

croisement de facteurs entraîne plusieurs réponses possibles, chacune excluant l'autre.

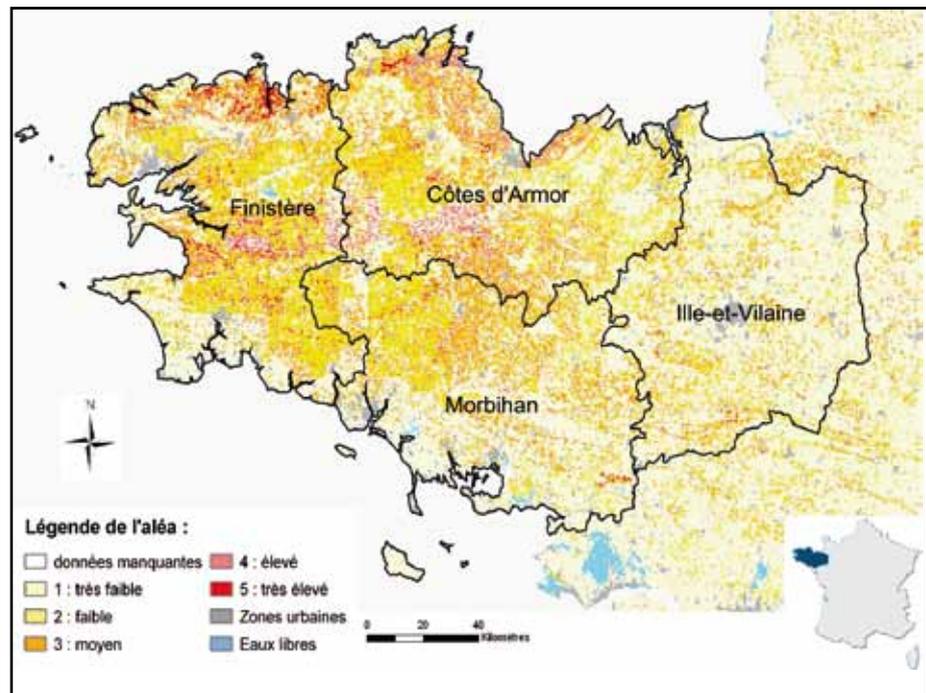
L'arborescence du modèle (figure 2) suit une hiérarchie qui privilégie les facteurs sur lesquels les activités humaines peuvent avoir une influence. Il s'agit, dans l'ordre décroissant d'importance donnée à chaque facteur, du type d'occupation du sol, du niveau de battance du sol, de l'intensité de la pente et du niveau d'érodibilité du sol. Chacun des types d'occupation du sol est traité à part et donne un poids différent à l'association des autres paramètres. Le croisement de ces paramètres produit une parmi cinq classes de sensibilité du sol à l'érosion (très faible, faible, moyenne, forte, très forte) qui traduit la sensibilité « agro-pédo-géomorphologique » de la zone considérée. Cette sensibilité est ensuite croisée avec le facteur climatique, lui-même organisé en cinq quintiles de pluviométrie, pour produire une parmi cinq classes d'**aléa érosion du sol** (très faible, faible, moyen, élevé, très élevé) sur la zone considérée (figure 3).

Le modèle MESALES combine ainsi les facteurs d'érosion « sol », « occupation du sol », « topographie » et « climat » sur une **maille carrée** qui correspond à la résolution du modèle numérique d'altitude (MNA) raster utilisé.

La sensibilité d'un sol à la **battance** est sa sensibilité à l'action de la pluie qui a tendance à le désagréger et à former une croûte imperméable en surface (Le Bissonnais *et al.*, 2000). L'**érodibilité** d'un sol est sa plus ou moins grande facilité à être emporté par le ruissellement ou des mouvements de terrain (Girard *et al.*, 2005). Ces deux facteurs sont estimés à partir des informations sur les sols disponibles dans la Base de Données

Figure 3 - Evaluation initiale de l'aléa érosif en Bretagne selon le modèle MESALES à une résolution de 250 m.

Figure 3 - Initial assessment of erosion risk in Brittany using the MESALES model at 250 m resolution.



Géographique des Sols de France au 1/1 000 000^e (Jamagne *et al.*, 1995), par application de règles de pédotransfert. Les sensibilités des sols à la battance et à l'érodibilité sont organisées en 5 classes allant de « très faible » à « très forte ».

L'**occupation du sol** est donnée par la carte d'occupation des sols CORINE Land Cover de 1990 avec une résolution de 250 m. Ses 44 types d'occupation du sol ont été reclassés en 9 classes correspondant chacune à un certain comportement vis à vis de l'érosion des sols : les terres artificialisées, les terres arables, les cultures permanentes, les prairies et pâturages, les zones agricoles hétérogènes, les forêts et zones arbustives, les zones naturelles dégradées, les espaces ouverts (en Bretagne, essentiellement les dunes) et les zones humides et surfaces en eau.

Les attributs du relief ont été calculés à partir du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) de la France en mode maillé au pas de 250 m (IGN). Cette résolution met l'accent sur les grandes tendances morphologiques mais ne détaille pas le relief local. Le **pourcentage de pente** moyen de chaque maille du MNA est calculé à partir de la plus grande différence d'altitude entre une cellule et ses huit voisines. Les classes de pentes utilisées pour le modèle sont au nombre de 8 (en %) :

[0-1] - [1-2] - [2-5] - [5-10] - [10-15] - [15-30] - [30-75] - >75

En ce qui concerne le climat, les données de **hauteurs de pluie moyennes** ont été spatialisées à l'échelle de la France par Météo-France selon la méthode AURELHY qui tient compte de l'environnement topographique des stations météorologiques et du relief. La base de données est disponible en mode maillé au pas de 5 km et fournit une valeur de hauteur de pluie moyenne sur 30 ans par pixel. L'ensemble de ces valeurs par pixel est classé en 5 quintiles de pluviométrie. Par ailleurs, nous disposons d'information sur l'**intensité des pluies** exprimées sous la forme de fréquences moyennes (en nombre de jours par mois) avec lesquelles des événements pluvieux catastrophiques dépassant 15 mm par heure se sont produits au cours de la même période de 30 ans. Ces deux informations climatiques sont combinées pour donner un indice d'**agressivité des pluies** en 5 classes (de très faible à très forte) (Le Bissonnais *et al.*, 1998).

La carte d'évaluation de l'aléa érosif du modèle MESALES établie à partir des sources d'information citées précédemment est présentée pour la Bretagne (*figure 3*) : les cinq classes d'aléa érosif (de très faible à très élevé) sont représentées et la structure régionale se caractérise notamment par des aléas érosifs plus élevés à l'ouest de la région que dans sa partie est.

PROPOSITION D'UNE MÉTHODOLOGIE DE VALIDATION DE L'ALÉA ÉROSIF D'UNE RÉGION

Une méthodologie de validation reposant sur des avis d'experts à l'échelle d'une région est proposée ici. Elle doit atteindre plusieurs objectifs : (i) délimiter les régions d'aléa érosif les plus élevés et identifier les causes supposées de cet aléa selon l'avis des experts ; (ii) soumettre, pour validation, les zones d'aléa érosif identifiées par le modèle MESALES à l'avis d'experts ; (iii) en cas de non validation par les experts, analyser les raisons de la divergence entre le modèle et les avis d'experts et dégager des pistes d'amélioration de l'estimation de l'aléa par le modèle (prise en compte de facteurs supplémentaires, amélioration de la qualité et de la résolution des données d'entrée).

La méthodologie de validation par dires d'experts (*figure 4*) inclut une démarche allant de la sélection d'un échantillon d'experts jusqu'à l'amélioration du modèle.

Sélection des experts

De cette sélection dépend l'efficacité de la validation par dires d'experts. Deux difficultés importantes se présentent : d'une part, les zones d'expertises recouvrent rarement l'ensemble de la zone d'intérêt, d'autre part les experts peuvent avoir des perceptions différentes du phénomène érosif.

La démarche prévoit de ce fait que les zones d'expertises se recoupent et que les experts interrogés aient un maximum de points de comparaison avec leur secteur dans la région. Il faut par ailleurs, par un ensemble de questions générales, interroger chaque expert sur sa perception du phénomène d'érosion et de ses facteurs explicatifs afin d'appréhender le mode de raisonnement sous-jacent à sa méthode de délimitation. Ainsi, l'expérience a montré que les experts ayant une vision régionale du processus raisonnaient essentiellement sur la base de grands ensembles pédologiques et climatiques, alors que les experts locaux prennent davantage en compte l'effet des pratiques agricoles.

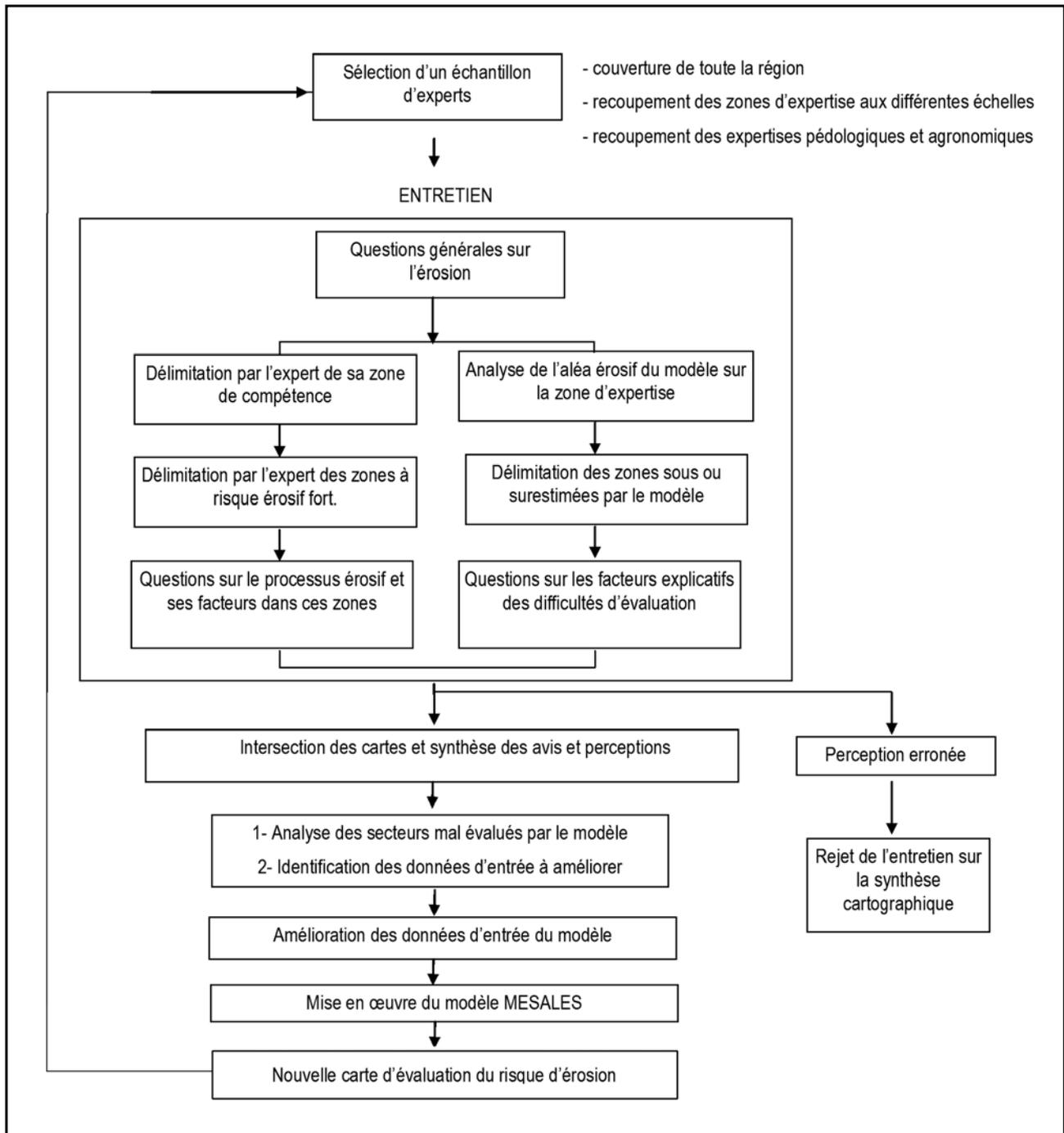
Une bonne connaissance des acteurs d'une région permet d'identifier les experts à rencontrer. Il est cependant important d'ajuster l'échantillonnage d'experts au fur et à mesure de l'enquête en vérifiant, grâce à un guide d'entretien, le recoupement à la fois des zones d'expertises et des perceptions du phénomène d'érosion.

Conduite d'entretien

La conduite d'enquête s'appuie sur un guide d'entretien réalisé à dessein. Il comporte tout d'abord des questions fermées permettant de se renseigner sur les phénomènes érosifs observés par l'expert (type, période, fréquence, intensité,

Figure 4 - Organigramme de la démarche de validation par dires d'experts.

Figure 4 - Framework of the validation procedure using expert knowledge.



hiérarchisation des facteurs), ainsi que sur sa perception de l'érosion (approche agronomique ou pédologique des processus). Des questions ouvertes amènent ensuite les experts à réagir sur des cartes. Il leur est d'abord demandé de tracer sur une carte vierge les zones où l'aléa d'érosion est le

plus important selon eux au sein de leur zone d'expertise. Puis, ils sont confrontés à la carte de l'aléa érosif obtenue avec le modèle MESALES, afin d'y délimiter les zones qu'ils jugent mal estimées par le modèle.

Extraction des résultats

La synthèse des résultats consiste en (i) la réalisation de cartes d'intersection des résultats des experts et du modèle (carte des zones de surestimation de l'aléa d'érosion par le modèle, carte des zones de sous-estimation de l'aléa d'érosion par le modèle, carte des zones où l'aléa devrait être homogène), (ii) le classement des réponses relatives à la perception des phénomènes érosifs par les différents experts, et (iii) la synthèse des spécificités climatiques, d'occupation du sol, pédologiques et/ou topographiques qui permettraient d'améliorer l'estimation de l'aléa d'érosion par le modèle MESALES.

APPLICATION DE LA MÉTHODE À LA REGION BRETAGNE

Délimitations de l'aléa d'érosion par les experts

La région Bretagne est divisée en 4 départements : les Côtes d'Armor, le Finistère, l'Ille-et-Vilaine et le Morbihan. Un expert régional ainsi qu'au moins un expert par département ont été sélectionnés. Ces derniers ont une approche pédologique marquée de la problématique de l'érosion. L'échantillonnage a donc été complété en sollicitant le point de vue plus agronomique de conseillers agricoles. Ceux-ci connaissent de manière pointue les types d'agricultures pratiquées, la manière dont sont gérés les sols, leur histoire et leur devenir probable. Ils exercent sur des secteurs de la taille de plusieurs communes, souvent à cheval entre deux départements ce qui permet de faire le lien entre les zones, plus vastes, d'expertises départementales.

16 entretiens ont été menés auprès de 10 conseillers agricoles de secteur, de 5 pédologues ayant une bonne connaissance des sols au moins à l'échelle d'un département entier (dont un présente une expertise régionale) et d'un expert du ruissellement.

Les zones d'expertises identifiées par les experts sont représentées sur la *figure 5*.

Délimitation de l'aléa érosif

La *figure 6* représente la délimitation, à dire d'expert, des secteurs de plus forte érosion, c'est-à-dire des secteurs où les experts ont observé le plus de manifestations d'érosion (par intensité croissante : atterrissements en bas de pente, ravines et coulées de boue) et où l'aléa érosif est le plus fort, selon eux, en raison d'une sensibilité spécifique à un des facteurs de l'érosion. Les experts pédologues ont construit leur zonage en délimitant les sols à risque, à savoir les limons éoliens du nord de la Bretagne et les schistes briovériens du centre de la Bretagne. Les conseillers agricoles se sont, quant à eux, plutôt appuyés sur

l'observation des manifestations les plus marquées de l'érosion au sein du paysage, ainsi que sur leur connaissance des secteurs où les itinéraires cultureux sont les plus agressifs pour les sols.

Deux experts ont préféré ne pas tracer de zonage et trois l'ont fait sous forme de hachures plutôt que de délimitation.

Pour plus de lisibilité, ces résultats sont transcrits sur la *figure 6* où la densité de hachures est proportionnelle au nombre d'experts qui ont reconnu la zone comme étant à risque.

La compilation des expertises permet d'identifier neuf zones principales, numérotées de 1 à 9, où l'aléa d'érosion est élevé (*figure 6 et tableau 1*).

En résumé, les experts rencontrés localisent les zones de plus forte érosion de Bretagne (*Figure 6*) : (i) dans les secteurs de cultures légumières et (ii) dans les zones à parcellaire de grande taille présentant des sols limoneux battants, en particulier des sols développés dans un matériau de limon éolien ou d'altération du schiste briovérien.

Evaluation de la carte d'aléa d'érosion MESALES

Suite à ce travail de délimitation, les experts ont évalué la carte régionale de l'aléa érosif issue du modèle MESALES (*figure 3*) : cette carte leur a été présentée brute ou intégrée au niveau communal (Le Bissonnais *et al.*, 2002) en lui superposant une information géographique suffisante (Scan 25 de l'IGN) pour que les experts puissent se repérer sans ambiguïté. Sur 13 experts qui se sont exprimés sur la validité de cette carte, 8 ont relevé d'importantes surestimations ou sous-estimations de l'aléa, dont tous les experts des Côtes d'Armor et de l'Ille-et-Vilaine. Les 5 autres ont considéré que la carte était globalement valide.

La *figure 7* compile les principaux résultats de l'analyse des experts en présentant : (i) en rouge, les zones d'aléa surestimé, (ii) en vert, les zones d'aléa sous-estimé ; (iii) et en hachures noires, les zones dont les caractéristiques pédologiques et agronomiques homogènes devraient présenter une valeur d'aléa plus homogène que celle estimée par le modèle.

Cinq zones sont considérées comme bien évaluées par l'ensemble des experts :

- les zones légumières de la côte Nord de la Bretagne dans le Finistère et les Côtes d'Armor à fort aléa érosif ;
- tout le sud de la Bretagne à faible aléa érosif qui présente des sols souvent peu profonds et limono-sableux sur granite. Les sols sont également très enherbés, surtout au sud du Morbihan ;
- le bassin de Châteaulin au centre Bretagne correspond à une délimitation nette d'aléa fort dominant ;
- et enfin les zones de landes et de forêts à risque faible (par exemple les landes de Lanvaux dans le Morbihan ou la forêt de Paimpont en Ille-et-Vilaine).

8 zones ont été considérées comme étant mal évaluées par

Figure 5 - Délimitation par les 16 experts (une couleur par expert) de leur zone d'expertise relative à l'aléa érosif des sols en Bretagne.
Figure 5 - Delineation by 16 experts of their expertise area (one colour for each expert) related to soil erosion risk in Brittany.

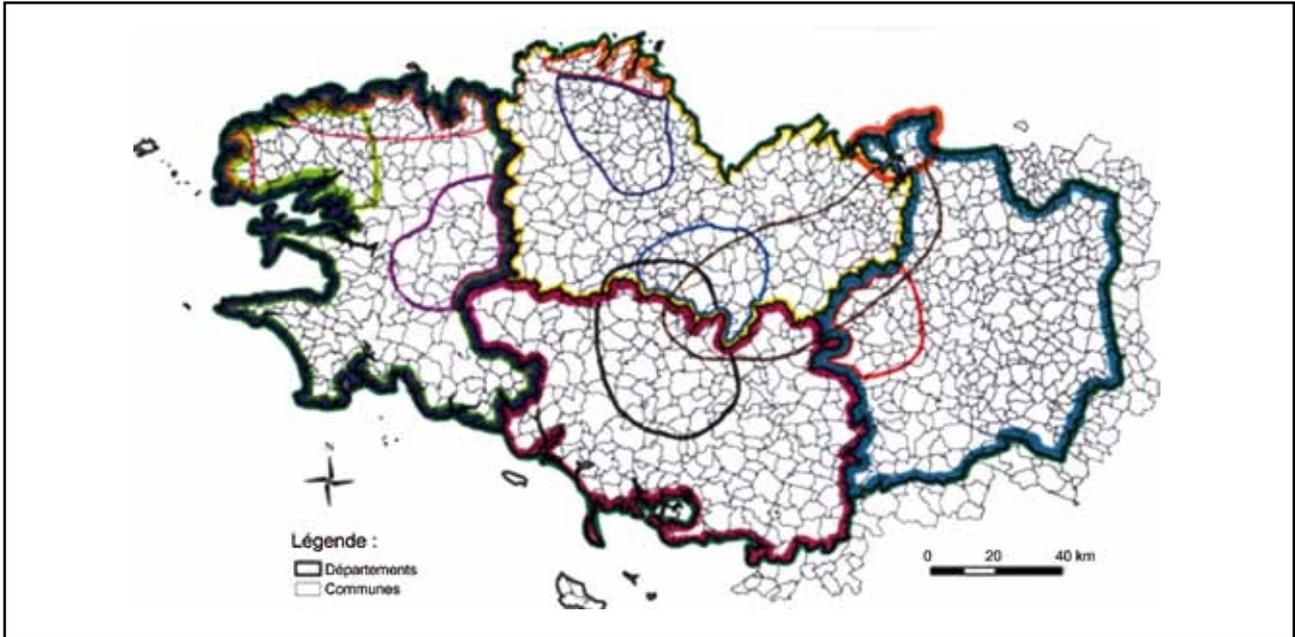


Figure 6 - Délimitation des zones de plus fort aléa d'érosion des sols par les experts (la densité de hachures est proportionnelle au nombre d'experts qui ont identifié un secteur à fort aléa d'érosion; les numéros renvoient aux commentaires du tableau 1).

Figure 6 - Delineation by the experts of the areas with the highest soil erosion risk (hatching density is proportional to the number of experts having considered the area with high erosion risk; the numbers refer to comments in table 1).

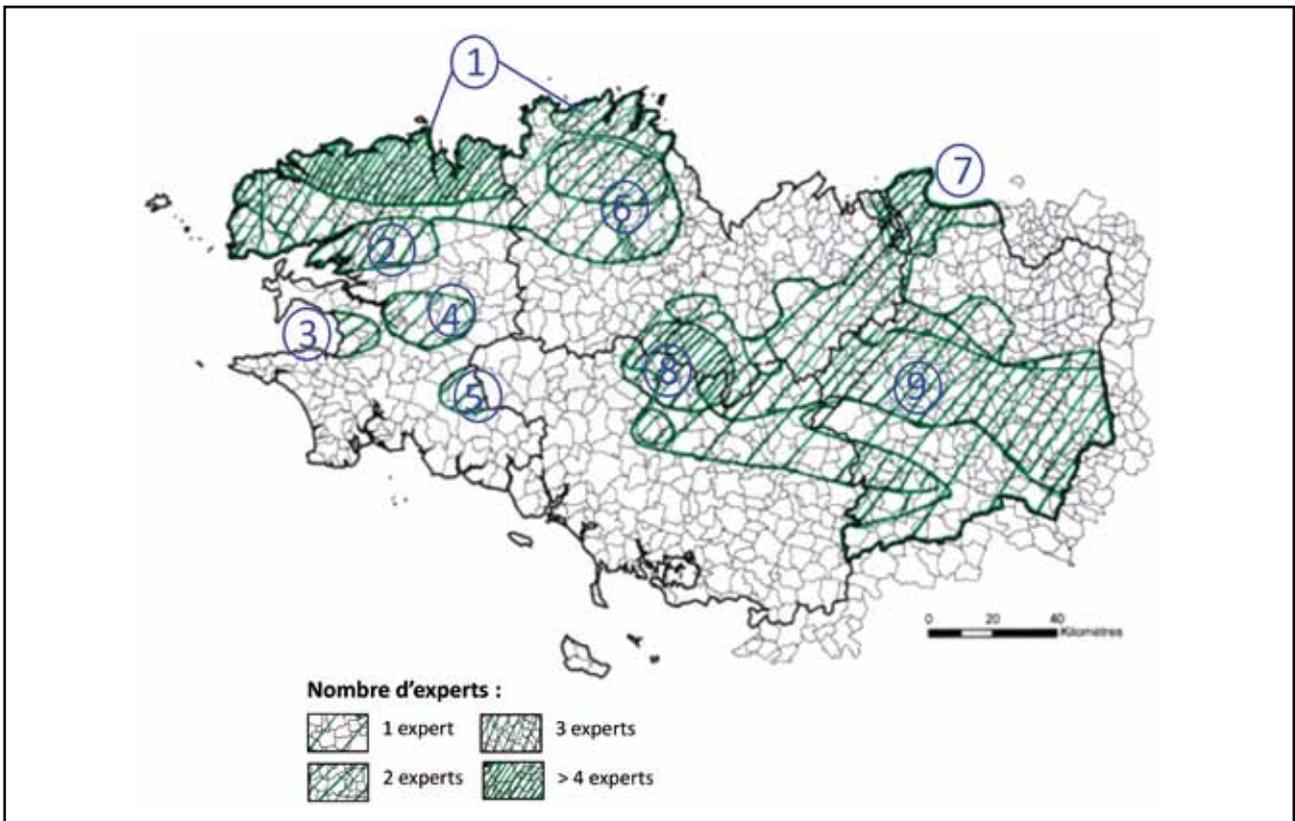


Tableau 1 - Synthèse des zones identifiées comme ayant un aléa d'érosion jugé fort par les experts et détails des facteurs ayant conduit à cet aléa (les numéros de zones renvoient à la figure 6).

Table 1 - Main areas in Brittany described by the experts with high soil erosion risk and associated reasons of this evaluation.

Zones à aléa élevé	Nombre d'experts	Raisons invoquées
1. Zone légumière de la région de St Pol de Léon	8	Texture limoneuse Teneur faible en matière organique Préparation très fine et buttage des sols Cultures répétées Pentes fortes
1. Zone légumière au nord des Côtes d'Armor	2	Texture limoneuse Préparation très fine et buttage des sols Cultures répétées
2. Zone de Doualas-Plougastel ou bassin de l'Elorn	3	Fortes pentes Texture limoneuse Préparation très fine et buttage des sols Cultures répétées
3. Bassin de l'Aulne ou de Châteaulin	1	Elevage et cultures intensifs Fort arasement des haies lors du remembrement Sols sablo-limoneux souvent drainés
4. Prolongement du bassin de l'Aulne à l'est, entre les Monts d'Arrée au nord et les Montagnes Noires au sud	1	Prolongement du bassin de production de Châteaulin, donc mêmes facteurs que celui-ci
5. Région de Scaër	1	Plus forte pluviosité de Bretagne Texture limoneuse et Sols drainés Longues pentes
6. Zone de Guingamp au sud de la zone légumière des Côtes d'Armor	1	Cultures intensives liées à des élevages intensifs
7. Zone légumière de Saint Malo	5	Texture limoneuse Pentes relativement fortes Forte pluviosité
8. Bassins de Pontivy dans le Morbihan et celui de Loudéac dans les Côtes d'Armor	5	Travail du sol intense (tamisage) et très fréquent Texture limoneuse et sols profonds sur schistes briovériens Remembrement intensif Parcelles de grande taille avec longues pentes
9. Bassin de Pontivy dans le Morbihan, bassin de Loudéac dans les Côtes d'Armor, et bassin de Rennes dans l'Ille-et-Vilaine.	2 pédologues départementaux + appui de 5 conseillers de secteur	Unité géologique de limons fins sur schistes briovériens

au moins un expert et sont délimitées sur la figure 7 :

Sous-estimation des zones n° 1, 2, 4, 7 et 8 :

Zone 1. Sous-estimation de l'extension de l'aléa érosif fort de la zone légumière du nord Finistère ;

Zone 2. Sous-estimation de l'aléa érosif dans le bassin de Rennes et aléa qui devrait être uniforme sur toute la zone développée sur schistes briovériens qui chevauche les Côtes d'Ar-

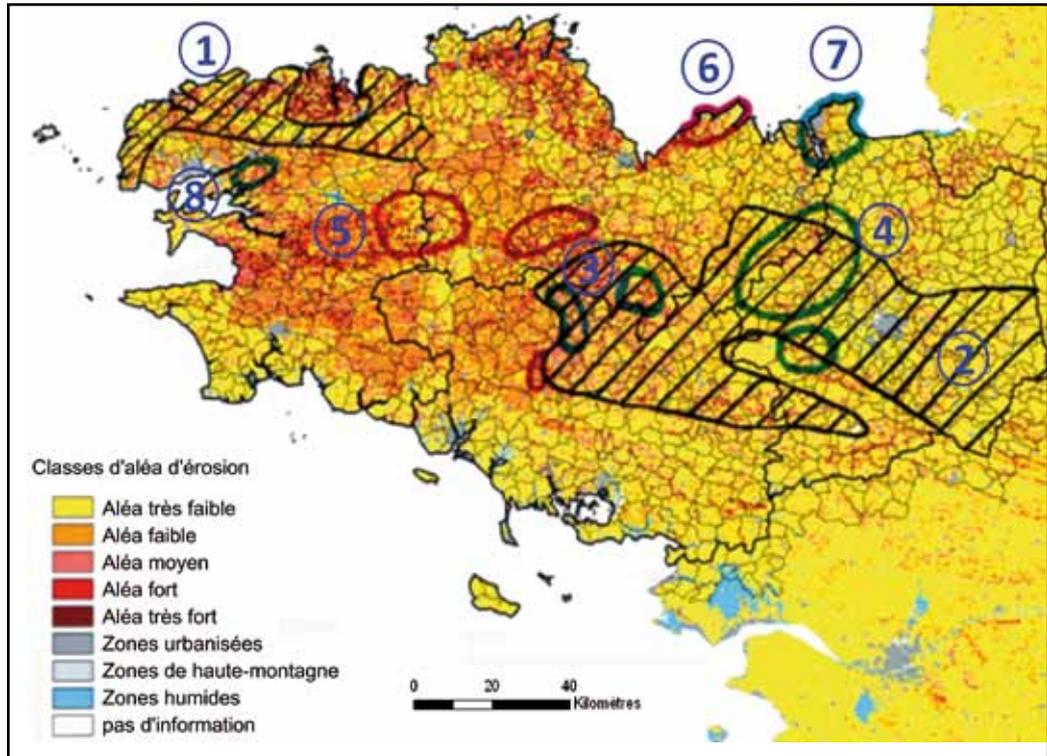
mor, le Morbihan et l'Ille-et-Vilaine ;

Zone 4. Sous-estimation de l'aléa érosif de la région agricole sur schistes briovériens situées à la frontière entre l'Ille-et-Vilaine et le Morbihan qui devrait avoir une intensité proche de l'aléa moyen ;

Zone 7. Sous-estimation très franche de l'aléa érosif de la région légumière de Saint-Malo (nord de l'Ille-et-Vilaine) qui présente les mêmes risques que les autres zones légumières dont

Figure 7 - Analyse par les experts de la carte d'estimation de l'aléa d'érosion des sols MESALES: (i) en rouge, surestimation, (ii) en vert, sous-estimation; (iii) en hachures noires, hétérogénéité exagérée.

Figure 7 - Analysis by the experts of the soil erosion risk map derived from the MESALES model: (i) in red, overestimation, (ii) in green, underestimation; (iii) in black hatches, exaggerated heterogeneity.



les aléas sont les plus forts de Bretagne;

Zone 8. Sous-estimation de l'aléa érosif de la zone de Plougastel-Daoulas (centre-ouest du Finistère).

Surestimation des zones n° 5 et 6 :

Zone 5. Surestimation de l'aléa dans le secteur de Carhaix qui se trouve entre les Monts d'Arrée et les Montagnes Noires. Ce sont des sols stables à forte teneur en matière organique avec une fréquence importante de prairies dans les rotations culturales;

Zone 6. Surestimation de l'aléa érosif du secteur d'Erquy qui présente une classe d'aléa aussi élevée que celle des zones légumières du nord de la Bretagne alors qu'aucun facteur ne le justifie.

Sur et sous-estimations au sein de la zone n° 3 :

Zone 3. Sur et sous-estimations locales de l'aléa dans les bassins de Pontivy et Loudéac justifiées par des variations de la topographie et des types de cultures.

Diversité de la perception de l'aléa érosif par les experts

Selon le type d'observations que font les experts, l'érosion peut être perçue soit en termes d'**érosion continue** à phénomènes chroniques (dépôt de terre de quelques millimètres en

bas de pente à la fin de chaque hiver), soit en termes d'**érosion exceptionnelle** dont les manifestations sont plus spectaculaires (ravines ou atterrissement sur route). En Bretagne, la moitié des experts a une double approche de l'érosion, mais tous ont une forte conscience des phénomènes exceptionnels.

En ce qui concerne les manifestations de l'érosion, les dépôts de terre à l'aval des parcelles sont considérées comme le phénomène le plus courant. Les ravines en plein champ apparaissent plus rarement, bien que les experts s'accordent à dire qu'ils en observent tous les ans de manière ponctuelle dans chaque département, notamment lors de gros orages de printemps. Plus de la moitié des experts ont déjà observé des atterrissements sur route et les coulées de boues sont présentées comme un phénomène courant dans les régions d'agriculture intensive. Les cours d'eau présentant une charge élevée en sédiments lors d'épisodes pluvieux importants sont considérés comme une manifestation très visible et actuelle de l'érosion, non observée il y a 30 ans.

De façon unanime, l'érosion est jugée maximale en hiver et au printemps. L'érosion de printemps est la plus spectaculaire. Elle a lieu lors de précipitations violentes où la pluie, abondante et agressive, tombe sur des sols nus en préparation de semis ou venant tout juste d'être semés (maïs, légumes). L'érosion hivernale est moins intense et est liée à une pluie continue qui engorge le sol. Ses manifestations ne sont donc bien visibles que les années les plus pluvieuses. Pour certaines cultures lé-

gumières qui laissent le sol nu en été, les orages d'été peuvent potentiellement déclencher l'érosion des sols.

Nous avons demandé aux personnes interrogées d'évaluer le pourcentage de leur zone d'expertise touchée tous les ans par l'érosion définie comme « exceptionnelle », se manifestant généralement par des parcelles présentant des ravines profondes. Deux groupes se sont distingués :

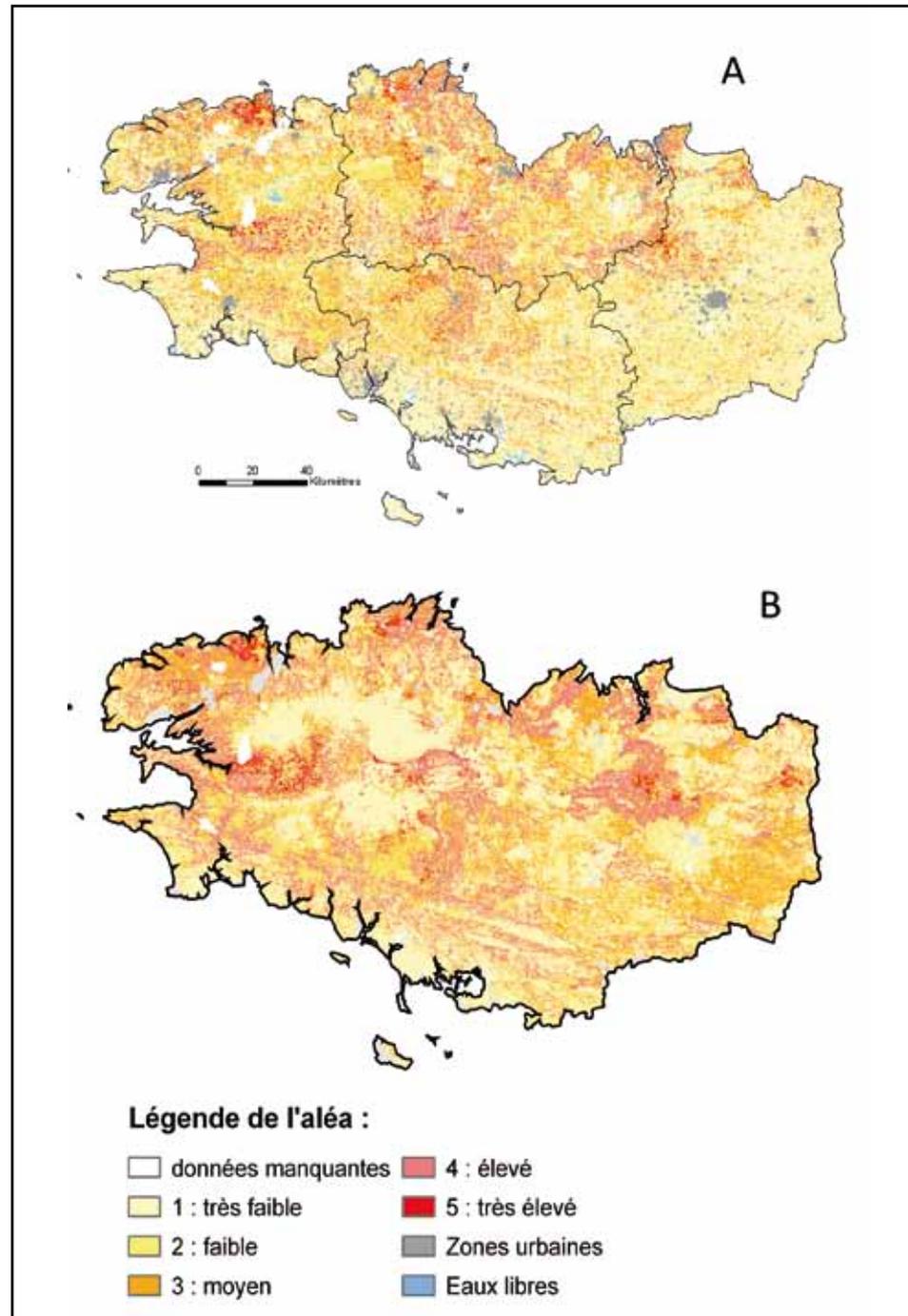
- les experts travaillant en zone légumière ou dans les régions où des sols limoneux sont cultivés de manière intensive (bassin de Loudéac ou de Pontivy par exemple) ont donné un chiffre compris entre 30 et 40 % de leur zone d'expertise;
- toutes les autres personnes (experts pédologues départementaux compris) ont évalué cette surface de très forte érosion à 10 % de leur zone d'expertise.

Tous les experts ont évoqué les impacts environnementaux sur les sols (perte en sol, etc.) et sur la qualité des eaux.

Seuls 9 experts sur 18 perçoivent que l'érosion a un réel impact sur l'agriculture: perte de sol, perte de semis de printemps par enfouissement ou entraînement en bas de pente sous l'effet du ruissellement, ou bien encore diminution du taux de matière organique des sols dans les cultures les plus intensives. Selon eux, l'érosion conduit, à plus ou moins long terme, à une perte en capital sol et donc à une diminution de la fertilité et de la réserve utile en eau. Parmi ces 9 personnes figurent les 5 experts du Finistère et les 3 experts de l'Ille-et-Vilaine. Ces 8 experts disent également observer des atter-

Figure 8 - Nouvelles cartes d'estimation de l'aléa d'érosion des sols de la Bretagne par mise en œuvre du modèle MESALES sur des données d'entrée améliorées (sensibilité à la battance, pente, occupation du sol). Les deux cartes diffèrent par l'origine des données d'occupation du sol: (A) CORINE Land Cover 2000; (B) Interprétation d'une image MODIS (Michel, 2006; Ledu-Blayo et al., 2008).

Figure 8 - New soil erosion risk map in Brittany as derived by the MESALES model on improved input data (sealing sensitivity, slope, land use). The two maps differ by the land use data source: (A) CORINE Land Cover 2000; (B) MODIS image interpretation (Michel, 2006; Ledu-Blayo et al., 2008).



rissements sur route et des coulées de boue, ce qui n'est pas le cas pour les autres départements.

AMELIORATION DES DONNEES D'ENTREE DU MODELE MESALES

Elaboration d'une nouvelle carte régionale de la sensibilité à la battance

11 experts sur les 18 interrogés ont commenté la carte de sensibilité des sols à la battance utilisée dans le modèle MESALES. Pour 7 d'entre eux, cette carte ne correspond pas à leur perception de la variabilité de la battance en Bretagne. Tous les 7 s'accordent sur la nécessité de prendre en compte le rôle de la matière organique sur la stabilité structurale des sols et de ce fait sur leur sensibilité à la battance (Le Bissonnais, 2003). En Bretagne, le taux de matière organique varie en effet dans une gamme très importante, de 1,5 à 7 % (Walter *et al.*, 1995).

Dans le modèle MESALES, la sensibilité à la battance prend en compte la texture de l'horizon de surface et le type de matériau parental, tous deux déduits de la carte pédologique au 1/1 000 000 de la France. Deux démarches parallèles ont été combinées pour augmenter la pertinence de cette cartographie de la sensibilité à la battance à l'échelle de la Bretagne (Colmar, 2006):

- accroissement de la précision des estimations spatiales de la texture de l'horizon de surface en tenant compte des résultats analytiques disponibles en Bretagne (BDAT - Saby *et al.*, 2004);
- prise en compte de la teneur en carbone organique en la croisant avec la granulométrie pour produire une carte de sensibilité à la battance plus précise.

Elaboration de deux nouvelles cartes régionales de l'occupation du sol

Les experts ont évalué à 30-40 % le pourcentage du territoire breton touché par des manifestations intenses de l'érosion (ravines) dans les zones légumières, contre 10 % dans les autres systèmes de culture (secteurs intensifs exceptés). En Bretagne, ces cultures légumières se trouvent le long des côtes Nord du Finistère, des Côtes d'Armor et de l'Ille et Vilaine dans la région de Saint-Malo. Elles correspondent aux zones où des limons éoliens se sont déposés sur des épaisseurs importantes le long des côtes. En tant que telles, les cultures légumières présentent un risque élevé d'érosion, car elles couvrent peu le sol et leurs itinéraires culturaux favorisent certains paramètres de l'érosion: affinement du sol, labours répétés chaque année, buttage dans le sens de la pente, récolte d'hiver sur sol limoneux non ressuyé. Leur présence sur des sols limoneux et battants constitue un risque supplémentaire majeur. Dans le cas de certaines cultures

légumières qui laissent le sol nu en été, les orages estivaux deviennent les déclencheurs les plus importants de l'érosion.

Le modèle MESALES appliqué à la France entière intégrait les 9 classes d'occupation du sol de la carte *CORINE Land Cover* publiée en 1990 au pas de 250 m. Une classification des paysages élaborée à une résolution de 250 m à partir d'images MODIS (Moderate resolution imaging spectroradiometer) par l'UMR LETG 6554 du COSTEL (Michel, 2006; Ledu 2008) a été testée de façon alternative pour estimer, au sein du modèle, le poids que prend le facteur occupation du sol dans l'évaluation de l'aléa d'érosion. La classification issue de MODIS intègre non seulement le type de culture mais également l'organisation du parcellaire.

Deux types particuliers de pédopaysages légumiers sont prévus dans la nomenclature de cette classification et identifiés: les cultures légumières de plateaux et les cultures légumières de plaine.

Deux bases de données améliorées sur l'occupation du sol ont été produites:

- d'une part, par l'utilisation de la version remise à jour en 2000 de la base de données *CORINE Land Cover*, à une résolution accrue de 100 m, et en ajoutant une 10e classe d'occupation du sol correspondant aux cultures légumières;
- d'autre part, par l'utilisation de la classification MODIS en la recodant selon les 10 classes définies ci-dessus pour *CORINE Land Cover*.

Ces deux bases de données sur l'occupation des sols de Bretagne, construites selon des approches différentes, sont intégrées alternativement dans le modèle (Colmar, 2006).

Elaboration d'une nouvelle carte régionale des pentes

La résolution de la base de données sur les pentes a été affinée par utilisation d'un MNA de l'IGN au pas de 50 m au lieu de 250 m et en conservant les mêmes classes de pentes que le modèle initial. Ceci permet de prendre en compte les petites variations du relief à l'origine d'érosion dans les zones de faible pente.

Ainsi, les données d'entrée sur la sensibilité des sols à la battance, sur l'occupation du sol et sur les pentes nécessaires au modèle ont été améliorées, d'une part en affinant leur résolution, et d'autre part en intégrant de nouveaux paramètres (Colmar, 2006).

Nouvelle carte d'aléa érosion et seconde session de validation

Le modèle MESALES a été mis en œuvre avec ces données améliorées sans modifier l'arbre logique de détermination de l'aléa d'érosion. Les deux bases de données sur l'occupation du sol ont été utilisées alternativement, conduisant à deux

modélisations différentes de l'aléa d'érosion à l'échelle de la Bretagne (figure 8) (Colmar, 2006).

Au cours d'une réunion, ces nouvelles cartes sont à nouveau soumises aux experts rencontrés lors de la première validation. Les nouvelles cartes ont été expertisées en comparant non seulement les aléas relatifs de grands ensembles pédologiques mais également ceux d'ensembles de communes ou de territoires agricoles homogènes. La principale zone de litige est le secteur situé au sud des Monts d'Arrée et au nord-est du bassin de Châteauain dans le Finistère pour laquelle la cause de la mauvaise estimation de l'aléa érosion n'a pas pu être identifiée.

Même dans le cas où les experts s'accordent à qualifier une zone comme sur- ou sous-estimant un aléa, ils peuvent avoir des explications différentes. Certains estiment que le rôle stabilisateur de la matière organique dans les sols n'a pas assez de poids dans l'évaluation du risque de battance par le modèle, alors que d'autres invoquent l'importance de la présence de prairies dans la rotation pour diminuer le risque érosif.

DISCUSSION ET CONCLUSION

La perception de l'aléa érosif par les experts n'est pas homogène et reflète souvent leur compétence première (pédologue *versus* agronome en particulier). De ce fait, il est difficile de délimiter des zones à aléa érosif élevé par simple compilation de leurs avis. De plus, les experts se sont sentis plus à l'aise pour réagir au zonage du modèle MESALES que pour délimiter par eux-mêmes des zones à risque élevé.

Le fait de disposer des résultats d'un modèle qualitatif comme MESALES est donc un support important. De par sa conception explicite, il permet aux experts de retrouver les facteurs à l'origine de telle ou telle estimation d'aléa érosif et de réagir de ce fait de façon plus pertinente.

Le traitement homogène effectué sur l'ensemble de la région prenant en compte une masse d'information considérable facilite le travail d'expertise. Il permet en effet aux experts de réagir par rapport à un zonage existant, ce qui est apparu comme une démarche efficace. L'avantage de la modélisation est de permettre le croisement d'un grand nombre de données d'entrée. Il apparaît dans le cas présent que le modèle est sensible à la qualité des données d'entrée et que la carte d'estimation de l'aléa d'érosion des sols est notablement modifiée lorsque l'on change les données d'entrée : 38 % de la superficie régionale change de classe d'aléa entre les deux jeux de données. Les nouvelles données induisent une réduction de la proportion de l'aléa « très faible » au profit des classes d'aléa « faible », « moyenne » et « élevé ». En particulier, la proportion de la classe d'aléa élevé passe de 4,7 % à 8,1 % de la superficie régionale.

Le travail de validation par dires d'experts permet une démarche aller et retour d'identification de paramètres d'entrée

à améliorer et à intégrer au modèle et de validation en boucle (figure 4).

Ce type de validation par dires d'experts présente cependant des limites. Il n'est réalisable que dans le cas où les zones d'expertises des différents experts intervenants se recoupent afin de disposer de zones de comparaison. La Bretagne est un territoire qui s'est bien prêté aux conditions de notre méthode de validation, car elle dispose d'un nombre significatif d'experts et qu'elle présente un nombre limité de systèmes de production agricole.

A l'échelle de la Bretagne, le nouveau zonage réalisé à partir de données d'entrée plus précises et avec une meilleure résolution correspond mieux aux avis des experts. L'aléa d'érosion des sols identifié à l'aide du modèle MESALES a été validé pour certaines zones, en particulier pour le Finistère. Il semblerait *a contrario* que l'aléa érosif reste sous-estimé dans la partie centre-est de la région (Ille-et-Vilaine).

La pertinence des avis d'experts est difficile à quantifier, mais les entretiens permettent sans conteste :

- de s'approprier les données et de mettre en évidence les problématiques régionales ;
- d'identifier les faiblesses du modèle par rapport au contexte régional et de proposer des voies d'amélioration – par exemple, l'injection de nouvelles données pour estimer la battance des sols ;
- de tirer des conclusions générales : les experts remettent plus en cause les données d'entrée que le modèle lui-même.

Le fait que le modèle MESALES soit un modèle par arbre de décision – par opposition à un modèle mécaniste – est un avantage dans le processus de validation par expertise, car les experts appréhendent bien sa démarche générale et comprennent l'origine de telle ou telle estimation d'aléa par le modèle. Ils sont de ce fait plus enclins à proposer des améliorations des données d'entrée qu'ils ne sauraient le faire pour un modèle mécaniste et dynamique.

L'efficacité de la méthode de validation par dires d'experts ne peut être chiffrée et il n'existe pas aujourd'hui de méthode de validation réellement efficace, faute de données adéquates. Les démarches de validation des modèles d'estimation des aléas érosifs doivent être mixtes et continuer à intégrer également des méthodes d'observation ou de mesures directes *in situ*, par exemple des mesures systématiques de dépôts de sédiments dans les bassins de rétention ou encore des mesures de flux de sédiments dans les cours d'eau.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les experts régionaux qui ont répondu favorablement à cette démarche de validation et d'amélioration des résultats du modèle MESALES. Ils remercient également les deux relecteurs d'une première version de l'article, V. Antoni du SOeS (ex IFEN) et B. Laroche d'Infosol Orléans, pour leurs conseils judicieux.

BIBLIOGRAPHIE

- Antoni V., Le Bissonnais Y., Thorette J., Zaidi N. Laroche B., Barthes S., Daroussin J., Arrouays D., 2006 - Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000^e et confrontation aux enjeux locaux. *Etudes et Gestion des Sols*. Vol.13. 3. 201-222
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchere V., King C., Antoni V., Surdyk N., Dubus I., Arrouays D., Desprats J.F., 2006 - Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n° 3: Synthèse et recommandations générales. BRGM/RP-55104-FR
- Colmar A. 2006 - Evaluation du risque érosif en Bretagne: Analyse de sensibilité et validation du modèle MESALES. Mémoire de fin d'études ENITA Bordeaux - UMR SAS INRA-Agrocampus Rennes - UMR INRA-AGRO LISAH Montpellier. 56p.
- Commission des Communautés Européennes. 2002 - Communication de la Commission du Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social et au Comité des Régions: Vers une stratégie thématique pour la protection des sols. COM 179 final. 39p.
- Desprats J.F., Bourguignon A., Cerdan O., Le Bissonnais Y., Colmar A., 2006 - Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n° 1: Etude de sensibilité sur le département de l'Hérault. BRGM/RP-55103-FR;
- Dubreuil N., Le Bissonnais Y., Daroussin J., Juin 2003 - Cartographie de l'aléa d'érosion des sols dans le département de l'Aisne. Unité de Science du Sol de l'INRA d'Orléans - Chambre d'Agriculture de l'Aisne. 48p.
- Girard M.C., Walter C., Remy J.C., Berthelin J., Morel J.L., 2005 - Glossaire de l'ouvrage Sol et Environnement. Dunod. 71p.
- Gruau G., Birgand F., Jarde E., Novince E., 2004 - Pollution des Captages d'Eau Brute de Bretagne par les Matières Organiques. UMR Géosciences du CAREN de Rennes, Cemagref de Rennes, G2R CNRS-Université de Nancy. 108p.
- 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), 153-172.
- Kirkby M., Jone R., Irvine B., Gobin A., Govers G., Cerdan O., Van Rompaey A., Le Bissonnais Y., Daroussin J., King D. Montanarella D., Grimm M., Vieillefont V., Puigdefabregas J. Boer M., Kosmas C., Yassoglou N., Tsara M., Mantel S., Van Lynden G., Huting J., Octobre 2003 - Pan European Soil Erosion Risk Assessment: The PESRA Map. Special publication Ispra. n°73. 30p.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D., 1998 - Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France. INRA Orléans. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. *Etude et Travaux*. 18, 91 p.
- Le Bissonnais Y., 2000 - Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion: la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules de sols cultivés. *Ingénieries - EAT*. 22, 27-36.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J. King D., 2002 - Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *CATENA*. 46, 207-220.
- Le Bissonnais Y., 2003 - Aggregate Breakdown Mechanisms and Erodibility. *Encyclopedia of Soil Science*. 6 p.
- Ledu-Blayo L., Michel K., Gouery P., Corpetti T., Lemercier B., Walter C., 2008 - Improving remote sensing contribution to soilscape maps. In: Hartemink A.E., McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L. (Editors), *Digital soil mapping with limited data* Springer, 2008, XXIV, 445 p. 109 illus., 55 in color., Hardcover, ISBN: 978-1-4020-8591-8 CL. 7)
- Licciardello F., Govers G., Cerdan O., Kirkby M. J., Vacca A., Kwaad F. J., 2009 - Evaluation of the PESERA model in two contrasting environments. *Earth surface processes and landforms*, vol. 34(5), 629-640.
- Michel K., Le Du-Blayo L., 2006 - Cartographie des pédopaysages de la Bretagne à l'aide de la télédétection. Mémoire de fin d'études à l'UMR Littoral-Environnement-Télédétection-Géomatique du COSTEL. 56 p.
- Saby N., Schwartz C., Walter C., Arrouays D., Lemercier B., Roland N., Squidant H., 2004 - Base de Données des Analyses de Terre: Procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. *Etude et Gestion des sols*. 11 (3), 235-253.
- Surdyk N., Cerdan O., Dubus I., 2006 - Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n°2: Etude de sensibilité sur le département de l'Oise. BRGM/RP-55049-FR.
- Van rompaey A., Vieillefont V., Jones R., Montanarella I., Verstraeten G., Bazzoffi P., Dostal T., Krasa J., Deventer J., Poesen J., 2003a - Validation des estimations de l'aléa érosion des sols à l'échelle européenne. *European Soil Bureau - Research Report No. 13*, 27 p.
- Van Rompaey A., Bazzoffi P., Jones R., Montanarella L., Govers G., 2003b - Validation Soil Erosion Risk Assessments in Italy. *European communities - Institute of Environment and Sustainability*. 20p.
- Vieillefont V. 2003 - Modélisation de l'aléa érosion hydrique à l'échelle européenne: Etat des lieux, analyse et validation. Mémoire de fin d'études ENSA Rennes-European Soil Bureau, Institute for Environment and Sustainability. 78 p.
- Walter C., Bouedo T., Arousseau P., 1995 - Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols Bretons et analyse de leur évaluation temporelle de 1980 à 1995. Rapport final de la convention d'étude entre le Conseil Régional de Bretagne et l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. CORPEP de l'ENSAR. 30p.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978 - Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. Supplement to Agriculture Handbook. 537, 58p.

