

# Cartographie du risque d'érosion hydrique à l'échelle parcellaire en soutien à la politique agricole wallonne (Belgique)

A. Maignard<sup>(1)</sup>, C.L. Bielders<sup>(1)</sup>, L. Bock<sup>(3)</sup>, G. Colinet<sup>(3)</sup>, H. Cordonnier<sup>(2)</sup>, A. Degré<sup>(3)</sup>, P. Demarcin<sup>(2,3)</sup>, A. Dewez<sup>(1,2)</sup>, N. Feltz<sup>(1)</sup>, X. Legrain<sup>(3)</sup>, N. Pineux<sup>(3)</sup> et A.I. Mokadem<sup>(2)</sup>

- 1) Earth and Life Institute - Environmental Sciences, Université catholique de Louvain, Croix du Sud 2, bte L7.05.02, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique
- 2) Service Public de Wallonie -Direction Générale Opérationnelle Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement - Département de la Ruralité et des Cours d'Eau - Direction du Développement Rural, Avenue Prince de Liège, 7, B-5100 Jambes, Belgique
- 3) Soil-Water Systems, Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, Passage des Déportés, 2, B-5030 Gembloux, Belgique

\* : Auteur correspondant : alexandre.maignard@uclouvain.be

## RÉSUMÉ

L'érosion hydrique des sols pose le problème de la protection de la ressource « sol » mais également de la prévention des impacts environnementaux et sociétaux qui y sont associés tels que la dégradation de la qualité des eaux de surface, l'envasement des retenues d'eau et des bassins d'orage ou encore les inondations boueuses. Afin de cibler au mieux les mesures de lutte anti-érosives, il convient d'identifier les parcelles agricoles les plus à risque d'érosion. Mettant à profit la disponibilité d'importantes bases de données en matière de climat, sol, topographie, parcellaire et occupation du sol, une procédure automatisée de calcul de l'aléa érosion hydrique potentielle à l'échelle parcellaire, adaptée du modèle RUSLE, a été mise au point pour la Wallonie (Belgique). La carte de l'aléa érosion potentielle montre une sensibilité maximale à l'érosion hydrique en Ardenne et Haute-ardenne, en raison du relief accentué et d'une érosivité plus importante des pluies. Pour les principales zones agro-pédologiques de Wallonie, un suivi des principales cultures (céréales d'hiver, maïs, betterave, pomme de terre, colza, lin) a également été réalisé, permettant d'estimer le facteur cultural C des principales successions culturales et ainsi l'érosion effective. La prise en compte de l'occupation du sol fait cette fois ressortir un aléa maximal dans les Régions (sablo-)limoneuses et le Condroz, en raison des superficies importantes de grandes cultures industrielles. En Ardenne et Haute-Ardenne, l'aléa d'érosion effective est faible en raison d'une couverture végétale dominée par les prairies permanentes. Enfin, sur base de la carte numérique des sols de Wallonie, une classification de la vulnérabilité des sols à l'érosion a été établie à partir du volume de sol exploitable par les racines. La vulnérabilité des sols apparaît élevée sur une majorité du territoire wallon, à l'exception des Régions (sablo-)limoneuses et de la Région jurassique. Un indice d'érosion, calculé comme le rapport de l'érosion potentielle (aléa) sur l'érosion tolérable (vulnérabilité), permet de calculer le risque d'érosion hydrique et, par conséquent, de cibler au mieux les parcelles pour lesquelles l'érosion constitue une menace majeure pour leur valorisation durable. Une gestion appropriée de ces parcelles par un choix judicieux en termes d'occupation du sol (forêt, prairie, rotations culturales) et de pratiques culturales (p.ex., TCSL, inter-cultures) devrait permettre d'y réduire les risques de dégradation des sols par érosion hydrique.

## Mots clés

Risque d'érosion hydrique, aléa d'érosion hydrique, érosion tolérable, SIG, cartographie du risque.

## SUMMARY

### SOIL EROSION RISK MAPPING AT FIELD SCALE IN SUPPORT OF THE AGRICULTURAL POLICY OF WALLONIA (BELGIUM)

Soil erosion by water raises the issues of soil protection as well as of prevention of important environmental and societal impacts such as degradation of surface water quality, silting up of reservoirs and storm basins, and muddy floods. In order to best target soil conservation measures, it is necessary to identify agricultural parcels that are most at risk of water erosion. An automated procedure based on RUSLE was developed for Wallonia (Belgium) in order to calculate the plot-scale potential soil erosion hazard, taking advantage of the availability of detailed databases regarding climate, soil, topography, land use and field boundaries in Wallonia. The resulting map shows that the Ardenne and the Haute-ardenne are particularly exposed to water erosion because of the rugged topography and higher rainfall erosivity. For the main agro-pedological areas of Wallonia, the main crops (winter cereals, maize, sugar beet, potato, rape, linen) were monitored, allowing to compute the C factor of the main crop rotations, and hence the effective soil erosion hazard. After taking land use into account, the highest water erosion hazard was observed in the Sandy-loam and Silt-loam areas and the Condroz as a result of the large acreage of industrial crops. In the Ardenne and Haute-ardenne, the effective erosion hazard is low because land use is dominated by permanent grassland. Finally, based on the Walloon numerical soil map, tolerable erosion rates were defined on the basis of the soil volume which can be exploited by roots. Soil vulnerability appears high in most of the Walloon territory except for the Sandy-loam, Silt-loam and Jurassic areas. A potential erosion index, calculated as the ratio of the potential erosion hazard and the tolerable erosion rate, allowed calculating the potential erosion risk. The latter can be used to best identify the agricultural plots with a high risk of water erosion, threatening their sustainable use. Appropriate management of these plots by means of suitable land use (e.g., forest, grass, crop rotations) and soil conservation practices (e.g., reduced tillage, cover crops) should allow reducing soil degradation by water erosion on these plots.

#### Key-words

Water erosion risk, water erosion hazard, tolerable erosion, GIS, risk mapping.

## RESUMEN

### CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA A ESCALA PARCELARIA EN APOYO A LA POLÍTICA AGRÍCOLA VALÓN (BÉLGICA)

La erosión hídrica de los suelos plantea el problema de la protección del recurso "suelo" pero igualmente de la prevención de los impactos ambientales y sociales que son asociados como la degradación de la calidad del agua de superficie, el encenagamiento de las retenidas de agua y de las cuencas de tormentas o aún de las inundaciones lodosas. A fin de dirigir a lo mejor las medidas de lucha anti-erosivas, conviene identificar parcelas con fuerte riesgo de erosión. Utilizando la disponibilidad de importantes bancos de datos sobre clima, suelo, topografía, parcelario y uso del suelo, se hizo un procedimiento automatizado de cálculo del riesgo de erosión hídrica potencial a escala parcelaria, adaptada del modelo RUSLE, por la Valonia (Bélgica). El mapa del riesgo de erosión potencial muestra una sensibilidad máxima a la erosión hídrica en Ardenas y Alta-Ardenas, a causa del relieve acentuado y de una erosividad más importante de las lluvias. Para las principales zonas agro-ecológicas de Valonia, se realizó un seguimiento de los principales cultivos (cereales de invierno, maíz, remolacha, papas, colza, lino) que permite estimar el factor cultural C de las principales sucesiones de cultivos y así la erosión efectiva. Le toma en cuenta del uso del suelo hace resaltar esta vez un riesgo máximo en las regiones (arenoso-) limosas y en el Condroz, a causa de las superficies importantes de cultivos industriales. En Ardenas y Alta-Ardenas, el riesgo de erosión efectiva está bajo en razón de una cubierta vegetal dominada por las praderas permanentes. En fin, sobre la base del mapa numérico de suelos de Valonia, se estableció una clasificación de la vulnerabilidad de los suelos a partir del volumen de suelo explotable por las raíces. La vulnerabilidad de los suelos aparece elevada sobre una mayoría del territorio valón, salvo las regiones (arenoso-) limosas y la región jurasica. Un índice de erosión, calculado como la relación de la erosión potencial (riesgo) y de la erosión tolerable (vulnerabilidad), permite calcular el riesgo de erosión hídrica y, por lo tanto dirigir al mejor las parcelas para las cuales la erosión constituye una amenaza mayor para su valorización sostenible, una gestión apropiada de estas parcelas por una elección juiciosa en termino de uso del suelo (selva, pradera, rotación de cultivos (por ejemplo: TCSL, inter-cultivos) debería permitir reducir los riesgos de degradación de los suelos por erosión hídrica.

#### Palabras clave

Riesgo de erosión hídrica, riesgo de erosión hídrica, erosión tolerable, SIG, cartografía del riesgo.

**A** l'échelle globale, l'érosion hydrique est un processus majeur de dégradation des sols. Ces derniers, au même titre que l'air ou l'eau, constituent une ressource environnementale à protéger car ils remplissent de nombreuses fonctions, essentielles au bon fonctionnement de nos écosystèmes. Le taux d'altération des matériaux parentaux étant généralement très faible (Verheijen *et al.*, 2009), le sol est généralement considéré comme une ressource non-renouvelable. Les phénomènes d'érosion, par les quantités de terre importantes mises en jeu, peuvent ainsi induire des perturbations au niveau des fonctions du sol, suite au décapage de la couche superficielle - la plus riche en matière organique - ou suite à une diminution importante de l'épaisseur globale du sol à certains endroits. L'érosion hydrique des sols a également un impact sociétal et environnemental important, en contribuant notamment à la dégradation de la qualité des cours d'eau, à l'envasement des cours d'eau, des retenues ou des bassins d'orage, ou encore à la formation d'inondations boueuses. A l'échelle européenne, Cerdan *et al.* (2010) ont estimé le taux d'érosion sur les terres arables à  $4,4 \pm 12,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Cette valeur monte en moyenne à  $12,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  si l'on considère uniquement les cultures de printemps. En Belgique en particulier, les bassins versants agricoles les plus exposés à l'érosion hydrique subissent des pertes en sol pouvant excéder les  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (Verstraeten *et al.*, 2006a). D'après Biolders *et al.* (2003), plus de deux tiers des municipalités wallonnes avaient subi au cours de la décennie 1991-2000 au moins un événement de type inondation ou coulée de boue directement lié au ruissellement originare des terres agricoles. Les dégâts causés aux propriétés privées et aux infrastructures publiques par de tels phénomènes entraînent des coûts qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions d'euros par an en Belgique (Evrard *et al.*, 2007). Sous climat tempéré humide tel qu'on le rencontre dans l'ouest européen, et bien qu'il puisse ponctuellement y avoir d'autres sources de sédiments, il est généralement admis que ce sont les parcelles agricoles qui sont les plus sujettes à l'érosion en raison du fait qu'elles sont les seules à présenter régulièrement un couvert végétal suffisamment faible pour permettre à ce processus de se déclencher.

Il apparaît donc nécessaire de limiter les phénomènes d'érosion par l'adoption de pratiques adéquates, en ciblant prioritairement les parcelles les plus à risque. Le risque se définit sur base de la conjonction d'un aléa et de la vulnérabilité du milieu à cet aléa (Liégeois *et al.*, 2004). Dans le cas présent, l'aléa s'exprime par le taux d'érosion ou par des variables apparentées comme la masse de terre érodée ou encore la charge en sédiment. De nombreuses approches de cartographie de l'aléa 'érosion' ont été proposées dans la littérature (p.ex., De Ploey (1989) ; Montier *et al.* (1998), Jäger (1994), Kirkby *et al.*, 2008 ; Prasuhn *et al.*, 2013). Bien que généralement qualifiées de 'cartographie du risque érosif' (« erosion risk mapping »), ces études sont toujours basées sur la seule quantification du taux d'érosion, selon une échelle qualitative ou quantitative.

Elles cartographient donc en réalité l'aléa, en supposant que le risque soit directement proportionnel à l'aléa. Une approche plus rigoureuse du risque doit cependant incorporer une caractérisation de la vulnérabilité en plus de l'aléa.

Dans la présente étude, les critères suivants ont influencé le choix de la méthodologie utilisée pour la caractérisation de l'aléa.

- 1) L'échelle spatiale choisie est l'échelle parcellaire afin de pouvoir sensibiliser l'exploitant face au risque potentiel de dégradation de ses terres. L'échelle temporelle est celle du long terme, à savoir l'érosion moyenne sur plusieurs décennies, représentative des choix de pratiques culturales et de rotation plutôt que de l'état de la parcelle à un temps donné.
- 2) Afin que le risque calculé soit la seule résultante des caractéristiques intrinsèques de la parcelle et de son mode de gestion, et non des caractéristiques et des pratiques de gestion des parcelles situées en amont, le risque devait être calculé en isolant la parcelle de son voisinage. Ce choix, assurément discutable du point de vue des processus hydrologiques et de transfert des sédiments, présente cependant l'avantage de mettre l'exploitant de la parcelle face à sa part de responsabilité. Dans les faits, ceci n'est d'ailleurs guère différent des approches récentes d'extrapolation de l'érosion hydrique à l'échelle européenne (voir, p.ex., Cerdan *et al.*, 2010) qui ne prennent pas non plus en compte la continuité des écoulements à l'échelle du bassin versant.
- 3) Vu l'échelle de travail et l'isolement hydrologique des parcelles, l'érosion par ravinement est exclu de la cartographie du risque.
- 4) Le modèle devait intégrer l'occupation du sol.
- 5) Le modèle devait être facilement intégrable dans un SIG, automatisable, et valoriser les bases de données détaillées disponibles en Wallonie en matière de sol, relief, parcellaire et occupation du sol. Le nombre de paramètres qui peut être dérivé de ces bases de données est cependant limité, ce qui exclut *de facto* le recours à des modèles déterministes.
- 6) Le modèle devait bénéficier d'un certain niveau de validation en Belgique ou, à défaut, de reconnaissance. Pour ces diverses raisons, l'estimation du risque d'érosion a été réalisée selon l'approche empirique de la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE, Renard *et al.*, 1997), modifiée en ce qui concerne le calcul de l'érosivité de la pluie et du facteur topographique. Le modèle RUSLE a été largement utilisé de par le monde dans une optique de cartographie du risque et de pilotage de schémas d'aménagements anti-érosifs (p.ex., Van der Knijff *et al.*, 2000 ; Lu *et al.*, 2004, Terranova *et al.*, 2009). Bien que non spécifiquement validé pour les conditions européennes, sa force provient de la très large base de données qui a servi à sa conception. Par ailleurs, le modèle USLE (Wischmeier et Smith, 1978), prédécesseur de RUSLE, avait fait l'objet d'une validation en Wallonie pour la Région limoneuse par Bollinne (1982).

Liégeois *et al.* (2004) résumant les différentes manières d'exprimer la vulnérabilité. L'approche suivie ici est l'approche

par dégâts. De nombreuses cibles potentielles peuvent être identifiées comme pouvant subir des dégâts lorsqu'elles sont soumises à un aléa érosion : la ressource sol en elle-même, qui subit l'érosion, les cultures arrachées ou ensevelies, les infrastructures, les personnes ou les ressources en eau touchées en aval par les apports de sédiments, etc. Dans le cas présent, l'optique qui a été adoptée est celle de la protection de la ressource sol. La cartographie du risque sera donc basée sur la conjonction d'un aléa érosif et de la vulnérabilité des sols à l'érosion. Le sol intervient donc à la fois dans la caractérisation de l'aléa et de la vulnérabilité. Or, la vulnérabilité doit s'exprimer sur base de critères qui ne sont pas redondants avec la caractérisation de l'aléa. Il convient donc d'être attentif à l'absence de corrélations entre l'aléa et la vulnérabilité du sol.

Dans la présente étude, l'évaluation de la vulnérabilité du sol se base sur l'établissement de seuils d'érosion tolérables par type de sol. Ces seuils d'érosion tolérables ont été définis en faisant l'hypothèse, certes simplificatrice, que la capacité du sol à remplir ses fonctions est proportionnelle au volume de sol exploré par les racines. Le volume de sol exploré a été déterminé par type de sol sur base d'informations dérivées de la carte numérique des sols de Wallonie (Legrain et al., 2011). Le calcul d'un indice d'érosion, rapport entre l'érosion potentielle (aléa) et le seuil d'érosion tolérable (vulnérabilité), permet alors de classer chaque parcelle en termes de risque intrinsèque de dégradation de la ressource sol par l'érosion hydrique. La prise en compte de l'occupation du sol, des successions culturales, voire des pratiques culturales ou des mesures anti-érosives, permettrait ensuite d'évaluer dans quelle mesure ces facteurs atténuent l'aléa érosion et donc le risque de dégradation de la ressource sol (Liégeois et al., 2004).

L'objectif de ce travail est donc quadruple : (i) cartographier pour chacune des parcelles agricoles de Wallonie l'érosion potentielle, fonction des caractéristiques climatiques, pédologiques et topographiques de la parcelle ; (ii) cartographier pour ces mêmes parcelles l'érosion effective, en prenant en compte l'effet des principales successions culturales ; (iii) définir et cartographier la vulnérabilité du sol à l'érosion selon le type de sol et enfin (iv) identifier les parcelles à risque d'érosion hydrique sur lesquelles des mesures devraient être mises en place prioritairement pour réduire le risque de dégradation à long terme de la ressource sol.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Calcul de l'érosion potentielle parcellaire

Le calcul de l'érosion potentielle parcellaire est effectué sur base de la Revised Universal Soil Loss Equation (équation 1, Renard et al., 1997).

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Équation 1

où E est la perte en sol moyenne à long terme [ $t \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ], R est l'érosivité de la pluie [ $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ], K est l'érodibilité du sol [ $t \text{ h mm}^{-1} \text{ MJ}^{-1}$ ], LS le facteur topographique qui prend en compte le gradient et la longueur des pentes (adimensionnel,  $\geq 0$ ), C le facteur cultural (adimensionnel,  $[0 \dots 1]$ ) et P le facteur « mesures anti-érosives » (adimensionnel,  $[0 \dots 1]$ ). L'érosion potentielle ( $E_p$ ) est définie sur base de l'équation 1 en posant les facteurs C et P égaux à 1. Les limites inhérentes à ce modèle ont été discutées entre autres par Yoder et al. (2001) et Roose (1994).

L'érosivité de la pluie (facteur R) a été déterminée pour la Wallonie sur base des moyennes pluviométriques annuelles établies de 1976 à 2005 suivant une répartition spatiale et temporelle des données pluviométriques par polygone de Thiessen (Dautrebande et Deglin, 2000 ; Demarcin et al., 2008) et selon l'équation proposée par Bolinne et al. (1980). La Wallonie bénéficie d'une carte numérique des sols à l'échelle du 1 : 20 000 (Legrain et al., 2011) de laquelle a été dérivée une carte d'érodibilité du sol (facteur K). Au vu du manque de données relatives à l'estimation de la structure et de la perméabilité des sols en Wallonie, le calcul de l'érodibilité a été réalisé en ne prenant en compte que la texture et la teneur en carbone organique. Des données à la parcelle n'étant actuellement pas disponibles pour la Wallonie, la teneur en carbone organique a été fixée à 1,4 %, ce qui correspond à la valeur moyenne des teneurs en carbone organique observées en régions de grande culture en Wallonie (Colinet et al., 2005). Sur cette base, 87,5 % des sols de Wallonie présentent une valeur d'érodibilité de plus de  $0,043 \text{ t h mm}^{-1} \text{ MJ}^{-1}$  liée à une texture principalement limoneuse. Le facteur LS de la RUSLE a été calculé selon la méthode proposée par Desmet et Govers (1996), adaptée aux reliefs complexes avec des pentes non-uniformes.

### Calcul de l'érosion « effective » parcellaire et détermination du facteur cultural C

L'érosion « effective » est le produit de l'érosion potentielle et du facteur cultural C qui rend compte de l'impact de la culture sur les pertes en sol. Il est fonction du Soil Loss Ratio (SLR) de la culture ainsi que de l'érosivité de la pluie (Renard et al., 1997). Le SLR varie entre 0 et 1, et est défini comme le produit de cinq facteurs qui peuvent être estimés moyennant la détermination du taux de couverture végétale, de la rugosité du sol, de la hauteur moyenne des plantes et du taux de couverture du sol par les résidus de culture (Gabriels et al., 2003).

Un suivi cultural a été effectué de 2009 à 2010 dans les régions agricoles de Wallonie présentant les surfaces en culture les plus importantes. Dans ces régions, seules les cultures représentant au moins 3 % de la surface totale en culture ont été suivies, à savoir la betterave, la pomme de terre, le maïs, le lin, le colza, le froment, l'épeautre et l'escourgeon. Le suivi de la végétation a été réalisé sur 5 parcelles

au maximum par culture et par région agricole, avec des observations toutes les deux à trois semaines. La hauteur des plantes a été mesurée sur le terrain à l'aide d'un mètre. La couverture végétale a été déterminée sur base de photographies verticales à l'aide du logiciel *CanEye* développé par l'INRA. Des photographies ont également été utilisées pour la détermination de la couverture du sol par les résidus. La rugosité du sol a quant à elle été mesurée à l'aide d'un rugosimètre à aiguille. A partir de ces mesures de terrain, un calendrier cultural par décade a été établi pour les principales successions culturales observées sur 3 années et obtenues à partir des 8 cultures suivies. Les données d'érosivité nécessaires pour calculer le SLR ont été tirées de Verstraeten *et al.* (2006b).

### Détermination de la vulnérabilité des sols

La vulnérabilité du sol a été exprimée sous forme de seuils d'érosion tolérable par le sol. Dans une optique de préservation des fonctionnalités du sol, quatre approches peuvent être proposées pour l'établissement de seuils d'érosion tolérable par type de sol :

- 1) *Aucune érosion n'est souhaitable.* Cette approche n'est clairement pas réaliste, ni même environnementalement souhaitable, puisque l'érosion a participé au façonnement de nos paysages et de nos sols depuis des millénaires.
- 2) *Les fonctionnalités du sol seront préservées à leur niveau naturel si le taux d'érosion du sol ne dépasse pas le taux d'érosion observé sous végétation naturelle.* D'après Morgan (2005), les taux d'érosion naturelle dépassent rarement les  $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , mais ils peuvent néanmoins dans certains cas atteindre des valeurs plus élevées (jusqu'à  $2\text{-}3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ). Dans cette approche, on considère le sol comme étant un héritage, fruit d'une très longue évolution, devant être préservé dans son état naturel. Une telle approche n'est cependant que partiellement réaliste puisque la mise en culture, en modifiant l'activité biologique, le cycle de l'eau, des éléments nutritifs et du carbone, le pH, le régime thermique, pour ne citer que ceux-là, implique à elle seule une modification des processus intervenant dans la pédogenèse. Par conséquent, la mise en culture influence *de facto* l'évolution des propriétés du sol et donc son fonctionnement. Or, la question de l'érosion hydrique en Belgique se pose essentiellement sur les terres de culture. Est-il dès lors raisonnable d'attendre de l'agriculture qu'elle maintienne les taux d'érosion à un niveau proche de l'érosion naturelle ? Pour cette raison, il ne nous a pas paru judicieux de prendre comme référence les taux d'érosion des sols dans leur état naturel.
- 3) *Les fonctionnalités du sol seront préservées si le taux d'érosion n'excède pas le taux de formation des sols.* Selon le type de sol, les taux de formation en Europe sont compris entre  $0,4$  et  $1,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (Verheijen *et al.*, 2009). Van Camp

*et al.* (2004) estiment que tout taux d'érosion  $> 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  est irréversible sur des périodes de 50 à 100 ans. Ces taux sont à peu près équivalents, voire même inférieurs, aux taux d'érosion sous végétation naturelle. Cette approche peut être vue comme une approche excessivement conservatrice. En effet, la vitesse de développement d'un sol n'est pas linéaire. D'après Kohnke et Bertrand (1959, *in* Schumm et Harvey, 1982) et Pimentel *et al.* (1976, *in* Schumm et Harvey, 1982), les premiers 25 mm d'un sol peuvent se former à un rythme de  $0,25$  à  $0,8 \text{ mm an}^{-1}$  selon les conditions de gestion, mais il faut 150 000 ans pour que ce même sol atteigne une épaisseur de 2,5 m (soit  $0,02 \text{ mm an}^{-1}$  en moyenne). Par ailleurs, le taux de régénération de l'horizon humifère superficiel est plus rapide que le taux d'altération du sol, jusqu'à plusieurs millimètres par an selon Hall *et al.* (1982). Cet horizon contribue vraisemblablement de façon plus que proportionnelle à son épaisseur aux diverses fonctions des sols. Il semble donc plus approprié de comparer le taux d'érosion avec le taux de régénération de l'horizon Ap plutôt que le taux de régénération du profil dans son ensemble. Sur cette base, il serait donc permis de tolérer des taux d'érosion qui dépassent sensiblement (jusqu'à un facteur 10) les taux d'érosion naturelle ou les taux d'altération des sols, pour autant que l'épaisseur du sol soit supérieure à un certain seuil en-deçà duquel les fonctions du sol seraient sérieusement affectées. Par exemple, Kazemi *et al.* (1990) montrent que même un décapage brutal de 5 cm de l'horizon superficiel n'a eu qu'un impact très limité sur les rendements de maïs ( $< 2 \%$  de perte de rendement), particulièrement lorsque les parcelles sont fortement fertilisées comme c'est le cas pour les cultures de type industriel. Cela nous conduit à la 4<sup>e</sup> approche.

- 4) *Il est acceptable de "consommer" la ressource sol pour autant qu'elle soit présente en excès par rapport aux besoins actuels et futurs.* Bien qu'à l'origine, cette formulation était principalement orientée vers l'exploitation des sols à des fins de productions agricoles ou forestières (Kral, 1982), cette vision n'est pas nécessairement anthropocentrique, puisque le terme 'besoins' peut englober tous les besoins des écosystèmes (Verheijen *et al.*, 2009). Cependant, les connaissances actuelles ne permettent pas de prédire avec suffisamment de précision l'impact de l'érosion du sol sur les propriétés / les fonctions du sol.

Aux Etats-Unis, l'USDA-NRCS (United States Department of Agriculture - National Resources Conservation Service) a proposé des taux d'érosion tolérables qui permettent de maintenir un haut niveau de productivité agricole à la fois économiquement soutenable et pérenne (Li *et al.*, 2009). Ces taux sont attribués à chaque type de sol en fonction de la présence d'horizons pouvant limiter le développement des racines et des propriétés de ces horizons sur base de connaissances expert. La vulnérabilité est donc basée sur le volume de sol explorable

par les racines. Les sols sont répartis en trois groupes en fonction de la sévérité de la contrainte, de son caractère permanent ou non, et de la possibilité de passer outre cette contrainte via l'adoption de pratiques agricoles spécifiques. Le groupe 1 concerne les sols présentant une contrainte permanente qui limite de manière significative le développement des racines (p.ex., un fragipan). Le groupe 2 reprend les sols qui présentent une contrainte modérée pour le développement des racines ou qui n'a pas un caractère permanent (p.ex., une nappe temporaire). Pour finir, le groupe 3 reprend les sols sans contraintes ou ayant des contraintes qui, dans certaines conditions climatiques ou via des pratiques culturales adaptées, n'ont pas d'impact sur les niveaux de productivité. Une valeur d'érosion tolérable comprise entre 2,5 et 12,5 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> est ensuite attribuée en fonction de la profondeur à laquelle se trouve la contrainte (USDA-NRCS, 1999 dans Li et al., 2009). Pour une même épaisseur de sol, la tolérance est croissante lorsque l'on passe du groupe 1 au groupe 3, et des sols minces aux sols profonds.

Compte tenu des informations disponibles au niveau de la carte numérique des sols de Wallonie, les facteurs suivants ont été considérés comme des contraintes au développement racinaire : présence d'un fragipan, d'un gley ou d'un pseudogley attestant de l'engorgement permanent ou temporaire en eau. L'adaptation de la méthode USDA-NRCS au contexte wallon repose sur les trois points suivants et a abouti à 11 valeurs d'érosion tolérables (tableau 1) :

- Pour chaque sol, la profondeur « utile », c'est-à-dire la profondeur jusqu'à laquelle la racine peut croître sans rencontrer de contraintes significatives, est déterminée. Compte tenu de l'information disponible, les classes de profondeur suivantes ont été adoptées : 0-20 cm, 20-40 cm, 40-80 cm, 80-125 cm, > 125 cm.
- Nous n'avons pas fait de distinctions en fonction du caractère plus ou moins contraignant de la contrainte. Les valeurs de références sont celles du groupe de sol n° 2 de la méthode USDA-NRCS (2,5 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour des sols < 25 cm à 12,5 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pour des sols > 150 cm).
- Enfin, le volume utile du sol est corrigé sur base de sa charge caillouteuse. Cette correction n'est pas effectuée par l'USDA, mais elle semble néanmoins pertinente. En effet, le volume réellement exploitable du sol (terre fine < 2 mm) diminue proportionnellement à la charge caillouteuse. Compte tenu de l'information disponible, trois catégories de charge caillouteuse sont différenciées. Si la charge caillouteuse est < 15 %, l'impact sur le volume utile de sol est considéré comme négligeable. Si la charge caillouteuse est comprise entre 15 et 50 %, alors le seuil tolérable pour chaque classe de profondeur est diminué d'un tiers par rapport à la valeur de référence. Si la charge caillouteuse est > 50 %, alors la valeur référence d'érosion est diminuée de moitié.

**Tableau 1** - Propositions de valeurs d'érosion tolérable selon les caractéristiques du sol en Wallonie.

**Table 1** - Suggested guidelines for the assignment of tolerable erosion rate values as a function of soil characteristics in Wallonia.

Profondeur utile (cm)	Peu caillouteux (< 15%)	Caillouteux (15-50 %)	Très caillouteux (>50%)
	Erosion annuelle tolérée (t.ha <sup>-1</sup> )		
0-20	2,5	1,5	1,0
20-40	5,0	3,5	2,5
40-80	7,5	5,0	3,5
80-125	10,0	6,5	5,0
> 125	12,5	8,5	6,5

Compte tenu de l'argumentaire développé ci-dessus, nous avons maintenu la valeur maximale d'érosion tolérable à 12,5 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> proposée par l'USDA-NRCS. D'autres pays ont cependant adopté des normes plus sévères. En Suisse par exemple, la norme est fixée à 2 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> si l'épaisseur du sol < 70 cm et à 4 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> si l'épaisseur du sol > 70 cm.

## Identification des parcelles à risque

Le risque d'érosion est calculé pour chaque pixel de la parcelle comme suit (équation 2) :

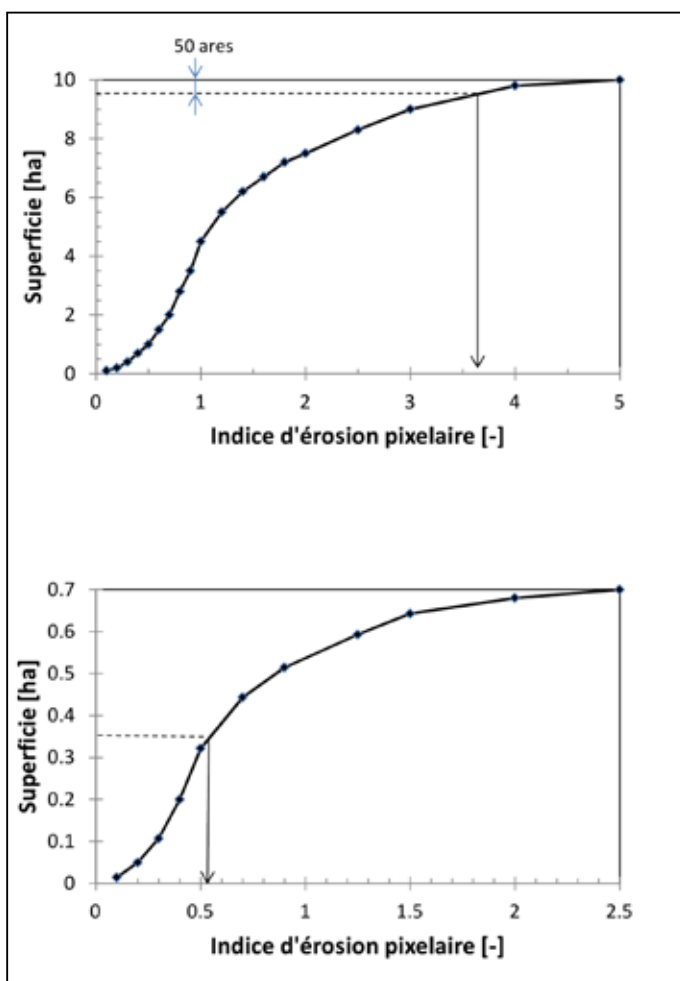
$$IE_p = E_p \cdot \frac{1}{T} \quad \text{Equation 2}$$

où IE<sub>p</sub> est l'indice d'érosion potentielle, E<sub>p</sub> [t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>] représente l'aléa érosif et 1/T est la vulnérabilité du sol avec T [t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>] le seuil d'érosion tolérable. Cette approche est identique à celle mise en œuvre par l'USDA-NRCS (Kort et al., 1998).

Avec cette méthodologie, chaque pixel se voit donc attribuer un niveau de risque. Le calcul du risque à l'échelle parcellaire fait intervenir deux étapes supplémentaires : l'attribution d'une valeur d'IE<sub>p</sub> à la parcelle, et l'attribution d'un niveau de risque en fonction de la valeur d'IE<sub>p</sub> parcellaire obtenue. L'IE<sub>p</sub> parcellaire est établi sur base de la relation entre la superficie cumulée et l'indice IE<sub>p</sub> (figure 1). Par cohérence avec l'approche utilisée antérieurement par l'administration wallonne pour identifier le risque parcellaire, le risque parcellaire (parcelles ≥ 1 ha) est la valeur de l'IE<sub>p</sub> pixelaire telle que 50 ares aient une valeur supérieure à cette valeur d'IE<sub>p</sub> (figure 1). On prend en compte les 50 ares les plus à risques. Pour les parcelles de petites dimensions (< 1 ha), c'est la moitié supérieure de la superficie qui est prise en compte (figure 1). Cette distinction entre grande et petite parcelle évite de classer

**Figure 1** - Méthode d'identification de l'indice d'érosion potentielle (IE<sub>p</sub>) parcellaire sur base de la relation entre la superficie cumulée de la parcelle en fonction de la valeur de l'indice d'érosion potentielle pixelaire. En haut, cas d'une parcelle ≥ 1 ha ; le trait tireté horizontal marque une valeur de superficie telle que 50 ares se trouvent au-dessus de cette limite. En bas, cas d'une parcelle < 1 ha ; le trait tireté horizontal marque la valeur de superficie correspondant à 50 % de la superficie totale de la parcelle. L'IE<sub>p</sub> parcellaire est indiqué par la flèche.

**Figure 1** - Method used for identifying the Potential erosion index (IE<sub>p</sub>), based on the relationship between the cumulative plot area and the pixel-scale value of the potential erosion index. Upper graph - plot ≥ 1 ha ; the horizontal dashed line is drawn such that 50 ares of the parcel are positioned above the line. Lower graph - plot < 1 ha ; the horizontal dashed line marks the area corresponding to 50 % of the plot area. The plot's IE<sub>p</sub> value is indicated by the arrow.



systématiquement les parcelles de petite dimension en classe de faible risque. Sur base de l'IE<sub>p</sub> parcellaire, un niveau de risque a été défini comme suit : IE<sub>p</sub> ≤ 1 : risque faible ; 1 < IE<sub>p</sub> ≤ 2 : risque moyen ; 2 < IE<sub>p</sub> ≤ 4 : risque élevé ; 4 < IE<sub>p</sub> ≤ 8 : risque très élevé ; IE<sub>p</sub> > 8 : risque extrême. Rappelons que l'IE<sub>p</sub> ne prend pas en compte la réduction de l'érosion par la couverture végétale et par les pratiques agricoles.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Erosion potentielle parcellaire

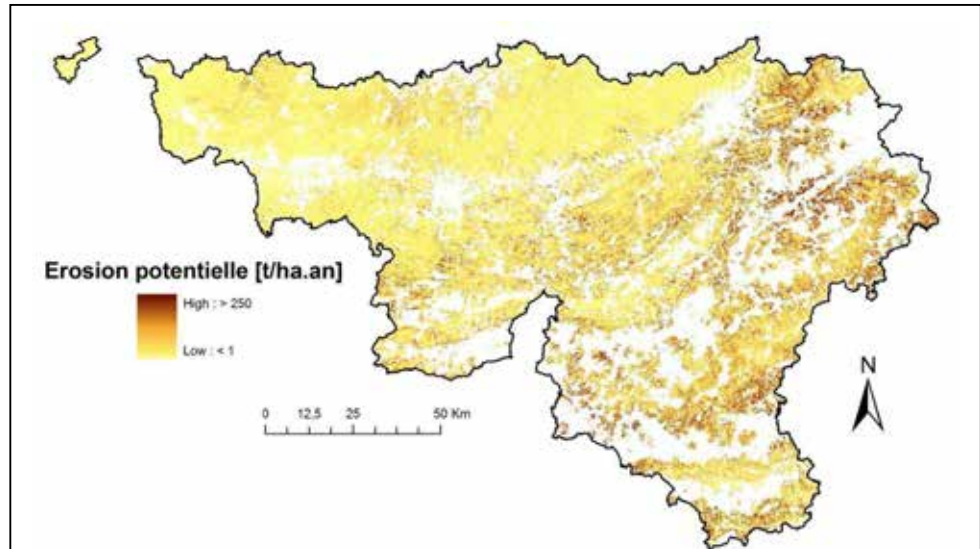
La figure 2 montre les valeurs d'érosion potentielle calculées en chacun des pixels de 10 m des parcelles déclarées en surface agricole en Wallonie et en considérant chacune des parcelles comme hydrologiquement isolées. Il en ressort que le sud et l'est de la Wallonie présentent les valeurs d'érosion potentielle les plus élevées. Ceci s'explique notamment par le fait qu'il s'agit des régions où l'érosivité (R) de la pluie est la plus importante et où le relief est le plus accidenté (facteur LS). La figure 3 montre que la carte d'érosion potentielle permet, pour une parcelle donnée, de localiser les zones les plus à risque. En moyenne, sur base du parcellaire 2009, l'érosion potentielle parcellaire (moyenne des pixels de la parcelle) était de  $47,9 \pm 54,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . La figure 4 montre la distribution des quelques 275 000 parcelles agricoles déclarées en 2009 en fonction de leur taux d'érosion potentielle.

L'utilisation de la RUSLE pour l'établissement des cartes d'érosion potentielle se justifie par sa simplicité et son intégration aisée dans un SIG. Elle a été utilisée par de nombreux auteurs à cette fin (p.ex., Jäger, 1994 ; Desmet et Govers, 1996 ; Lu *et al.*, 2004 ; Terranova *et al.*, 2009 ; Prasuhn *et al.*, 2013). Cependant, en plus des limites inhérentes au modèle lui-même (Yoder *et al.*, 2001 et Roose, 1994), le calcul de l'érosion potentielle comporte également des imprécisions liées aux incertitudes associées aux paramètres d'entrée et à l'interpolation de ces données (pluie, sol, topographie). Le modèle utilisé et les données d'entrée permettent néanmoins de mettre en évidence, d'une manière relative, les parcelles présentant des caractéristiques favorables à la dégradation du sol par l'érosion hydrique.



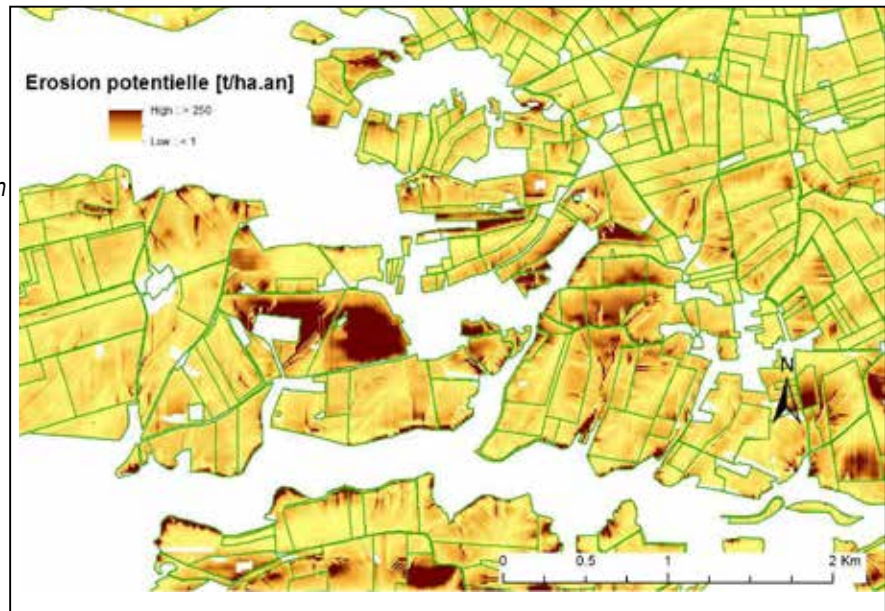
**Figure 2** - Carte du taux d'érosion potentielle du parcellaire agricole wallon par pixel de 10 m (parcelles isolées hydrologiquement).

**Figure 2** - Potential soil erosion rate map of the Walloon agricultural parcels with 10-m pixel resolution (plots are hydrologically isolated).



**Figure 3** - Détail de la carte des taux d'érosion potentielle par pixel (résolution de 10 m), illustrant la variabilité intra-parcellaire.

**Figure 3** - Detail of the 10-m pixel resolution map of the potential soil erosion rate, illustrating the field scale variability.



## Cartographie du facteur C et de l'érosion effective

La carte de la Wallonie des facteurs C a été établie sur base des successions culturales de 2007 à 2009 (figure 5). Ces valeurs sont quelque peu supérieures à celles issues de la littérature pour des études menées en Flandre (Verstraeten *et al.*, 2001 ; Gabriels *et al.*, 2003), sans qu'il n'ait été possible d'expliquer ces différences compte tenu des informations partielles disponibles dans ces publications.

Pour un peu plus de 15 % de la surface agricole, la valeur du facteur C ne peut être définie car les successions culturales

font intervenir au moins une culture (principalement des cultures maraichères) pour laquelle le facteur C est inconnu. On note également une absence de données pour ces cultures dans la littérature pour les conditions pédo-climatiques de l'Europe de l'ouest. Le *tableau 2* montre la répartition des facteurs C selon les régions agricoles. On observe clairement une scission entre d'une part le sud et l'est de la Wallonie (Fagne, Famenne, Région herbagère, Haute-ardenne, Ardenne, Région jurassique) avec des valeurs de facteur C généralement faibles en raison des nombreuses prairies, et d'autre part le Nord avec des valeurs de facteur C les moins favorables en raison de la présence fréquente des grandes cultures industrielles dans les rotations.



**Tableau 2** - Valeurs des facteurs C des successions culturales pour les percentiles 10 et 90 ainsi que pour la médiane pour les différentes régions agricoles. Un exemple de succession sur 3 ans est fourni pour chaque valeur de facteur C (B = betterave, Es = escourgeon, F = froment, M = maïs, P = prairie, Pdt = pomme de terre).

**Table 2** - 10<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> percentiles and median of the crop rotations C factor values for the agricultural areas in Wallonia. Crop rotation examples are given for each C factor (B = sugar beet, Es = barley, F = wheat, M = maize, P = grass, Pdt = potatoes).

Région agricole	Facteur C de la succession culturale		
	Percentile 10	Médiane	Percentile 90
Ardenne	0,10	0,12	0,55
Exemple	2P-1Es	2P-1M	3M
Campine hennuyère	0,12	0,45	0,55
Exemple	2P-1M	1Pdt-2F	3M
Condroz	0,12	0,40	0,48
Exemple	2P-1M	1B-2F	1L-2F
Fagne	0,12	0,46	0,55
Exemple	2P-1M	2F-1M	3M
Famenne	0,15	0,43	0,55
Exemple	2P-1M	Es-F-M	3M
Haute-ardenne	0,15	0,15	0,55
Exemple	2P-1M	2P-1M	3M
Région herbagère	0,15	0,46	0,55
Exemple	2P-1M	2F-1M	3M
Région jurassique	0,15	0,43	0,55
Exemple	2P-1M	Es-F-M	3M
Région limoneuse	0,37	0,44	0,50
Exemple	Es-F-B	F-B-Pdt	2M-1F
Région sablo-limoneuse	0,37	0,43	0,50
Exemple	Es-F-B	Es-F-Pdt	2M-1F

La combinaison des valeurs d'érosion potentielle et des valeurs du facteur C permet d'établir la carte d'érosion effective (Ee) pour la Wallonie. Celle-ci montre à nouveau une scission entre le Nord et le Sud du pays (*figure 6*), bien qu'inversée par rapport à la tendance observée pour l'érosion potentielle (*figure 2*). La valeur d'érosion effective parcellaire moyenne est de  $4,6 \pm 8,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  sur l'ensemble de la Wallonie avec une différence moyenne de  $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  entre les parcelles situées dans le sud et l'est ( $3,5 \pm 9,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ; Fagne, Famenne, Haute-ardenne, Ardenne, Région jurassique, Région herbagère) et les autres régions agricoles ( $5,4 \pm 7,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ). Ceci met en évidence le rôle prépondérant de l'occupation du sol, du choix des rotations et des cultures dans la gestion du risque érosif.

## Seuils d'érosion tolérables (Vulnérabilité)

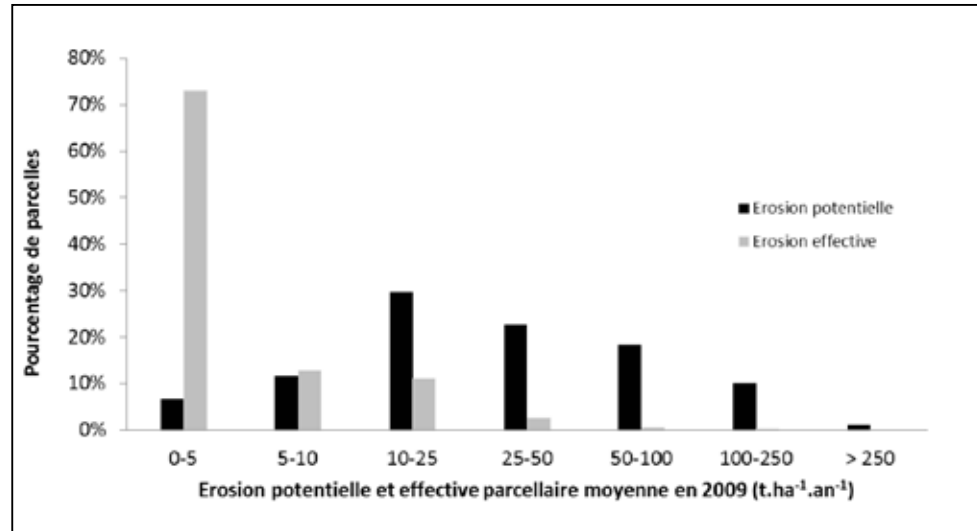
La *figure 7* montre les valeurs d'érosion tolérables pour les sols de la Wallonie. Cette valeur n'a pas pu être déterminée pour près de 14,5 % de la surface totale en Wallonie. Il s'agit pour un peu plus de la moitié de zones non cartographiées au niveau de la carte des sols et de zones urbaines, mais également de sols cartographiés pour lesquels l'information sur la profondeur est trop imprécise ou indisponible. Les classes 1,5 et  $2,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (*tableau 1*) étant très peu représentées, respectivement 0,6 et 0,3 %, elles ont été regroupées en une seule classe dont la valeur d'érosion tolérable a été fixée à  $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Les Régions limoneuse et sablo-limoneuse présentent les taux d'érosion tolérables les plus élevés (*figure 7*), en raison de la prédominance de sols profonds, à bon drainage, ne présentant pas de contraintes au développement racinaire dans les premiers 125 cm du profil. De plus, ces sols ont une charge caillouteuse quasiment nulle. La Haute-ardenne, la Région herbagère, le Condroz et la Famenne sont caractérisés par une forte proportion de sols avec une ou plusieurs contraintes au développement racinaire dans les premiers 125 cm et/ou une charge caillouteuse > 15 %. Ces régions sont par conséquent caractérisées par des seuils d'érosion tolérables relativement faibles en moyenne (*figure 7*).

Les surfaces présentant une valeur d'érosion tolérable de  $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  correspondent majoritairement à des surfaces en prairie car elles sont très peu aptes à la culture (faible épaisseur et forte charge caillouteuse). La valeur de  $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  représente environ 17 % de la SAU, dont environ un tiers en culture et deux tiers en prairie. La valeur de  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  est pour moitié en culture et pour moitié en prairie, et représente environ 15 % de la SAU. Les surfaces avec une valeur de  $12,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  dominant largement avec un pourcentage de la SAU avoisinant les 41 %, dont près de 33 % en culture.

L'établissement des seuils d'érosion tolérables est basé sur plusieurs hypothèses et notamment que la vulnérabilité est proportionnelle au volume de sol exploitable par les racines. La relation entre l'épaisseur du sol et sa capacité à remplir une fonction donnée dépend assurément de la fonction visée. En l'absence de données précises, l'hypothèse de la linéarité (*tableau 1*) bénéficie au moins de l'avantage de la simplicité. Cette hypothèse mérite à l'avenir d'être affinée d'une part par l'établissement de relations entre l'épaisseur du sol et la capacité du sol à remplir ses fonctions environnementales, sociales et économiques (voir p.ex., Bakker *et al.*, 2004), et d'autre part par une meilleure prise en compte de la nature et des caractéristiques des sols, ce que la base de données actuelle permet difficilement. Nous avons

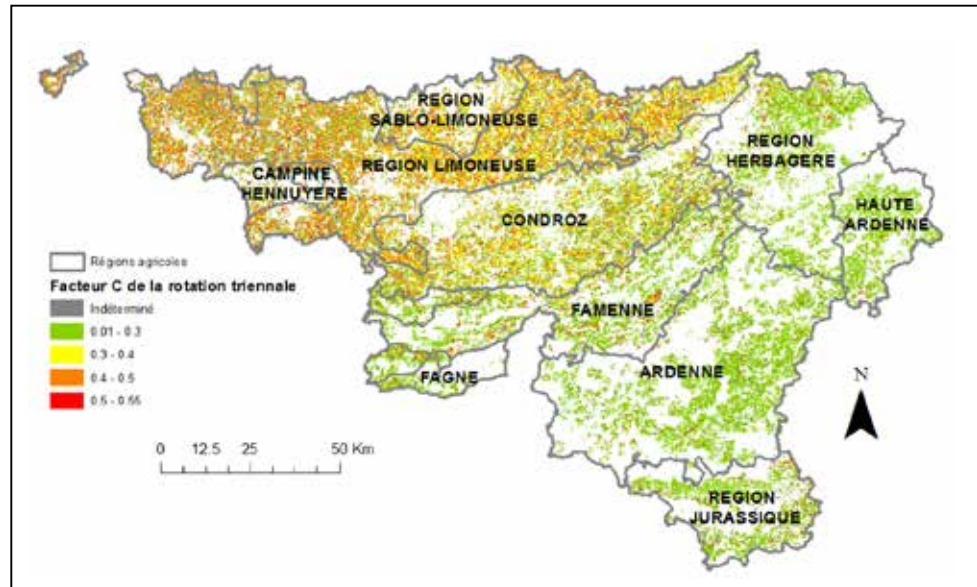
**Figure 4** - Distribution des parcelles agricoles déclarées en 2009 selon leur valeur moyenne d'érosion potentielle et effective.

**Figure 4** - Distribution of agricultural plots according to their mean potential and effective soil erosion rate value in 2009.



**Figure 5** - Carte du facteur C des principales successions culturales répertoriées sur base du parcellaire agricole de 2007 à 2009.

**Figure 5** - C-factor map of the main crop rotations documented on the basis of the agricultural land use between 2007 to 2009.



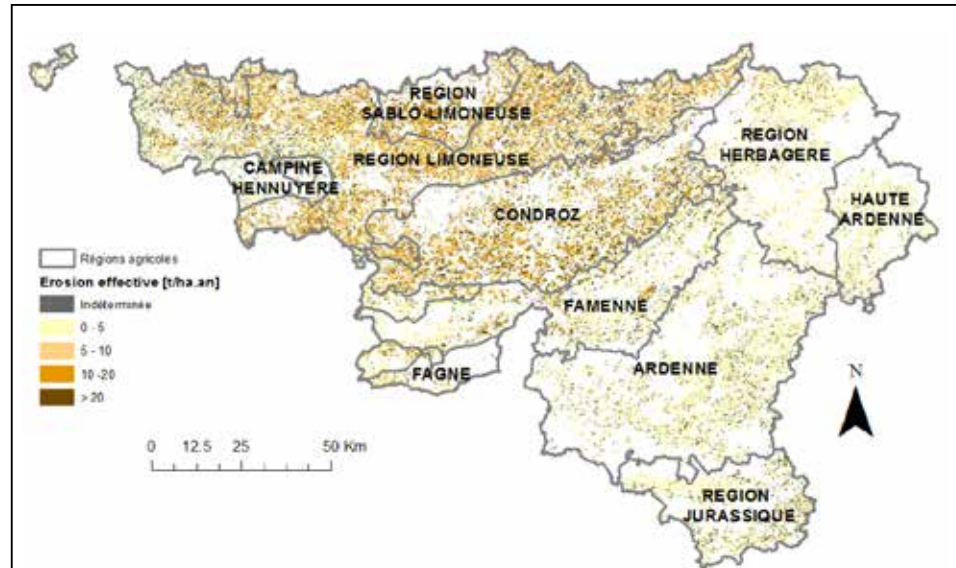
également posé que l'épaisseur du sol n'était pas limitante lorsque celle-ci dépasse 125 cm. Vu que la méthodologie vise principalement les parcelles agricoles, cette hypothèse semble acceptable, l'essentiel des racines ainsi que de la faune et flore étant cantonné dans cette couche. Par ailleurs, vu la très faible occurrence de stress hydrique dans les conditions climatiques wallonnes, les racines présentes à plus de 125 cm de profondeur contribuent probablement de façon marginale au fonctionnement des plantes cultivées.

## Cartographie du risque d'érosion via l'Indice d'érosion potentielle (IEp)

La figure 8 montre la répartition géographique de l'Indice d'érosion potentielle parcellaire. Les parcelles localisées dans le sud et l'est de la Wallonie (Ardenne, Haute-ardenne, Région herbagère, Région jurassique, Fagne, Famenne et une grande partie du Condroz) présentent essentiellement des indices d'érosion potentielle supérieurs à 8. Ceci s'explique d'une part par la vulnérabilité des sols (faibles valeurs d'érosion tolérables) liée à la faible profondeur des sols et à leur charge caillouteuse et d'autre part, par un relief accidenté et des aléas climatiques en moyenne plus érosifs, conduisant

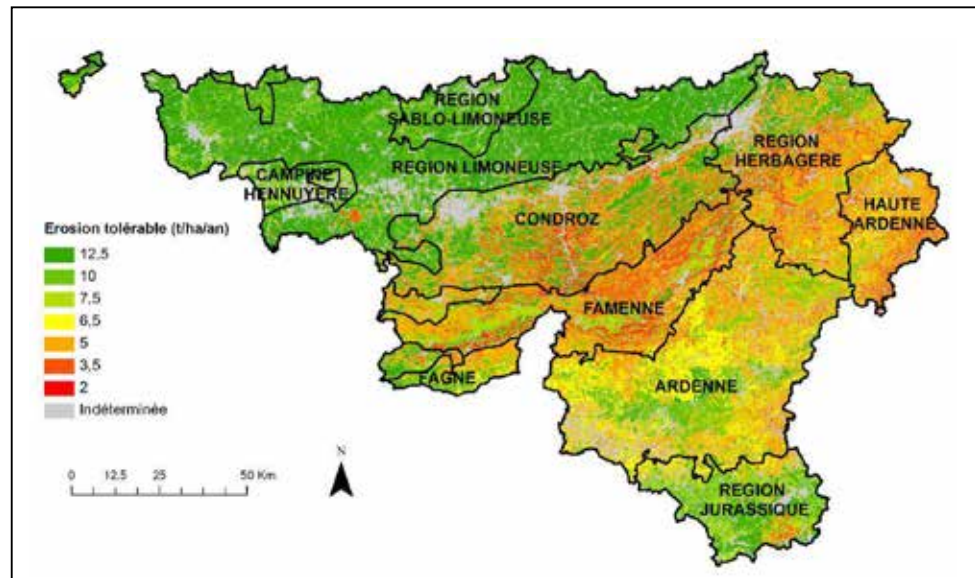
**Figure 6** - Carte de l'érosion effective moyenne parcellaire sur base des rotations 2007-2009.

**Figure 6** - Plot-scale map of the mean effective soil erosion rate based on the 2007 to 2009 crop rotations.



**Figure 7** - Carte des seuils d'érosion tolérable pour la Wallonie. Les classes de 1,5 et 2,5 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> étant peu représentées ont été fusionnées en une classe de 2 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.

**Figure 7** - Tolerable soil erosion rate map of Wallonia. The 1.5 and 2.5 t ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> erosion rate classes have been combined into a single 2 t ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> class because of their low frequencies.



aux valeurs d'érosion potentielle les plus élevées. La Région sablo-limoneuse présente des indices d'érosion pour la plupart supérieurs à 8 ou en tout cas supérieurs à 4. Pourtant, cette région présente des valeurs d'érosion tolérable élevées car les sols y sont profonds et peu caillouteux. L'indice d'érosion y est élevé du fait de la texture sablo-limoneuse des sols et d'un relief relativement accidenté induisant un aléa d'érosion potentielle élevé. Les parcelles en Campine hennuyère et en Région limoneuse présentent quant à elles des indices d'érosion pour la plupart compris entre 2 et 4. En effet, la vulnérabilité des sols dans ces régions est la plus faible et l'aléa d'érosion potentielle y est modéré. La Campine hennuyère et la partie occidentale de la Région limoneuse, c'est-à-dire les

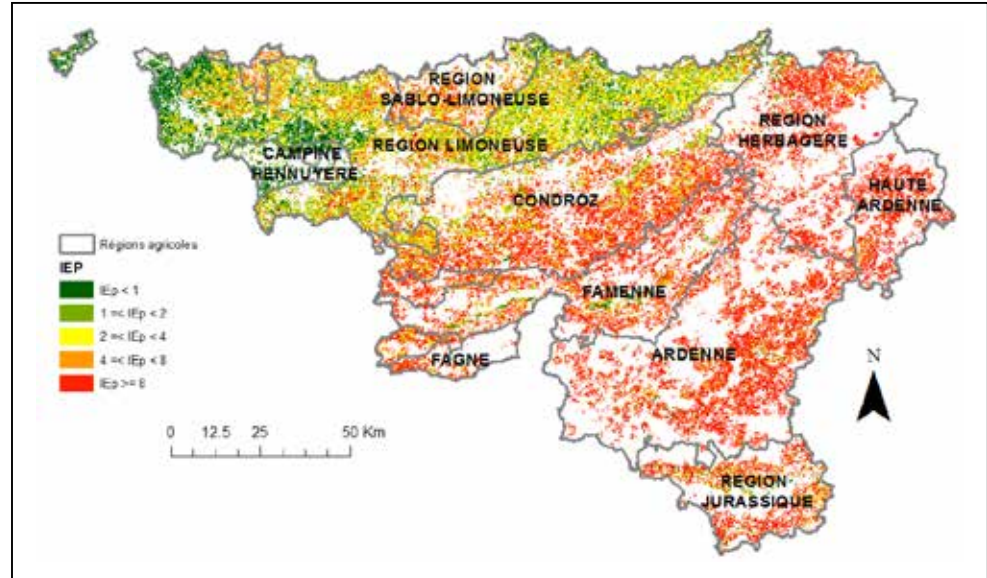
régions les moins accidentées et qui subissent les aléas climatiques les moins érosifs de Wallonie en moyenne, montrent des indices d'érosion potentielle inférieurs à 2 et même à 1.

Une des utilisations possibles de la carte de risque d'érosion hydrique parcellaire est l'identification des parcelles à risque dans le cadre de la conditionnalité (1<sup>er</sup> pilier de la PAC). L'indice d'érosion permet de cibler les parcelles pour lesquelles des restrictions ou des contraintes de gestion pourraient être imposées. Pour les parcelles les plus à risque, il pourrait s'agir d'une mise en prairie, d'un redécoupage parcellaire afin de limiter les longueurs de pente pour les cultures les plus sensibles à l'érosion ou encore de la mise en place d'intercultures ou d'aménagements anti-érosifs spécifiques.



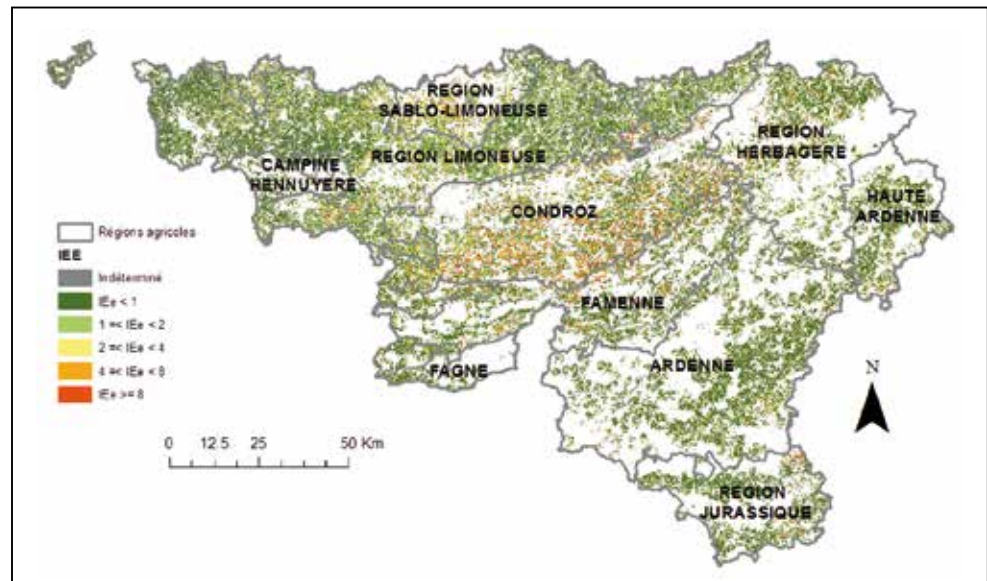
**Figure 8** - Carte des indices d'érosion potentielle ( $IE_p$ ) des parcelles déclarées en 2009.

**Figure 8** - Potential soil erosion index ( $IE_p$ ) map for the 2009 agricultural land use.



**Figure 9** - Carte des indices d'érosion effective ( $IE_e$ ) des parcelles déclarées en 2009 sur base de la rotation 2007-2009.

**Figure 9** - Effective soil erosion index ( $IE_e$ ) map for the 2009 plots based on the 2007-2009 crop rotation.



Actuellement, l'approche utilisée pour cibler les parcelles à risque est basée sur un critère de pente uniquement. Lorsque la parcelle est classée à risque, l'agriculteur se voit imposer des contraintes de gestion. La méthodologie de cartographie du risque érosif présentée ici constitue une avancée importante par rapport à la méthodologie actuelle puisqu'elle prend en compte l'ensemble des facteurs intervenant dans l'érosion hydrique diffuse et en rigoles : érosivité de la pluie, nature du sol à la fois en termes de sensibilité à l'érosion et de vulnérabilité, relief et occupation du sol.

Afin de conserver une certaine continuité avec le système actuel, l'identification des parcelles à risque sur base de la cartographie du risque d'érosion potentielle est réalisée selon une

approche binaire. Une parcelle est donc classée comme à risque ou non. Cela implique d'identifier la valeur de l' $IE_p$  au-delà de laquelle la parcelle est considérée à risque d'érosion. Le *tableau 3* montre l'impact du choix de la valeur d'indice d'érosion potentielle sur le nombre de parcelles définies comme à risque d'érosion ainsi que la surface agricole concernée. En toute logique, il conviendrait de choisir l' $IE_p$  de telle façon que l'Indice d'Erosion effective ( $IE_e$ ) ne dépasse pas 1, c'est-à-dire que le taux d'érosion effectif ne dépasse pas le seuil de vulnérabilité de la parcelle. En supposant qu'un choix judicieux de rotations et de pratiques culturales permette de réduire l'érosion potentielle de 75 % ( $C = 0,25$ ), cela reviendrait à classer toutes les parcelles ayant un  $IE_p > 4$  comme étant à risque. Avec ce critère, 60 %

**Tableau 3** - Pourcentage du nombre de parcelles et de la SAU définis comme hautement érodible selon la valeur seuil de l'indice d'érosion potentielle. Calculs effectués sur base du parcellaire 2009.

**Table 3** - Percentages of the number of crop parcels and agricultural surface identified as highly erodible based on the potential erosion index value. Calculations based on the 2009 agricultural land use.

Indice d'érosion potentielle	Pourcentage du nombre de parcelles concernées	Pourcentage de la SAU concernée
2	62%	78%
4	46%	60%
6	37%	51%
8	31%	45%
10	27%	40%
12	23%	36%
14	21%	33%
16	18%	31%
18	16%	28%
20	14%	26%

de la SAU serait classée à risque. Cependant, étant donné que pour environ 5 % de la SAU, cet indice ne peut être calculé en raison du manque d'information sur les sols, la surface définie comme hautement érodible est probablement sous-estimée.

Dans la pratique, le choix de l' $IE_p$  qui marque la limite entre parcelles à risque ou non fera l'objet de négociations politiques qui prendront en compte les superficies concernées. Actuellement, cette valeur seuil d' $IE_p$  n'a pas été fixée pour la Wallonie. Aux Etats-Unis, un indice d'érosion de 8 a été retenu. L'application de cet indice à la Wallonie aboutirait à l'identification de 31 % des parcelles, soit 45 % de la SAU. Avec un indice de 8, les parcelles à risque couvrent quasiment tout le sud du pays jusqu'au Condroz. Cependant, relativement peu de parcelles cultivées sont ciblées car 75 % de ces parcelles sont des prairies. Très peu de parcelles avec  $IE_p > 8$  sont présentes dans les Régions (sablo-)limoneuses, bien qu'on y constate des problèmes d'érosion importants pouvant générer des inondations boueuses (p.ex., Bielders *et al.*, 2003 ; Evrard *et al.* ; 2007). Cette apparente contradiction provient notamment du fait que les parcelles sont considérées ici comme hydrologiquement isolées et que la cartographie du risque érosif est basée sur la vulnérabilité du sol (vulnérabilité sur site) et non sur la vulnérabilité des infrastructures (vulnérabilité hors site).

Du point de vue de la conservation des sols, l'utilisation d'un  $IE_p$  de 8 comme limite inférieure pour identifier les parcelles à risque d'érosion serait une aberration. En effet, si l'on appliquait un  $IE_p$  de 8 en Wallonie, ceci reviendrait à accepter que 90 % des parcelles puissent avoir un taux d'érosion effectif plus de 3 fois supérieur au seuil de vulnérabilité dans les zones de grandes cultures (Régions limoneuse et sablo-limoneuse). Cette estimation se base sur la valeur du facteur C correspondant au 10<sup>e</sup> percentile de la distribution (tableau 2). Pour ces parcelles, il semble peu réaliste que la seule adoption de pratiques favorables à la conservation du sol telles que les techniques culturales sans labour (TCSL), une optimisation de la gestion de la matière organique ou la mise en place d'une couverture hivernale puisse permettre de ramener l'érosion effective au niveau de l'érosion tolérable. Si l'on considère les facteurs culturaux des successions culturales par région agricole (tableau 2), il semble qu'un indice d'érosion de 4 puisse être recommandé. En effet, un tel indice reviendrait à sélectionner les parcelles avec une érosion effective au moins 1,5 fois supérieure à l'érosion tolérable pour les régions de grandes cultures (Régions limoneuse et sablo-limoneuse) si la succession culturale mise en place fait partie des successions culturales avec les facteurs culturaux les plus faibles (Percentile 10). Pour les régions comme l'Ardenne et la Haute-ardenne présentant peu de cultures, la simple mise en place des successions culturales les plus courantes permettrait de réduire d'un facteur 6 à 8 le rapport entre l'érosion potentielle et l'érosion tolérable. Pour les régions agricoles où les cultures industrielles sont présentes (sans toutefois atteindre les proportions observées en Régions (sablo-)limoneuses), un indice d'érosion de 4 reviendrait à sélectionner des parcelles présentant une érosion effective au minimum entre 1,6 et 1,8 fois supérieure à l'érosion tolérable si la succession culturale correspond à la succession culturale moyenne pour la région. Dans ces mêmes régions, le rapport entre l'érosion potentielle et l'érosion tolérable pourrait également être réduit d'un facteur 6 à 8 simplement en pratiquant l'une des successions culturales les plus favorables, c'est-à-dire en installant une prairie 2 années sur 3 (Percentile 10 ; tableau 2).

La figure 9 présente la répartition géographique des valeurs d'Indice d'Erosion effective ( $IE_e$  ; équation 2 après remplacement de  $E_p$  par  $E_e$ ) parcellaire sur base des successions culturales observées de 2007 à 2009. Elle démontre que, dans les faits, les valeurs d' $IE_e$  sont pour la plupart inférieures à 2. On retrouve également des valeurs inférieures à 1, en particulier en Ardenne et Haute-ardenne, bien que la vulnérabilité du sol y soit importante. Ceci est lié au fait que ces régions sont caractérisées par une forte proportion de prairies limitant l'aléa érosion. Le Condroz présente une grande proportion de parcelles avec un indice d'érosion effective supérieur à 2 qui s'explique à la fois par la vulnérabilité des sols dans cette région et par un relief accidenté, auxquels s'ajoutent des rotations peu

favorables pour limiter les phénomènes érosifs. Cette carte met également en évidence une situation critique en Région sablo-limoneuse ainsi que quelques spots critiques en Région limoneuse.

A l'avenir, l'identification des parcelles devra encore être améliorée en intégrant au calcul de l'érosion potentielle parcellaire les phénomènes de redéposition au sein de la parcelle. Il sera également nécessaire de pouvoir définir une valeur d'érosion tolérable pour les parcelles reposant sur des sols actuellement non cartographiés par la carte numérique des sols de Wallonie. Notons enfin que seul l'aléa érosion hydrique est pris en compte dans ce travail et comparé à la vulnérabilité des sols. Cette approche est quelque peu optimiste. En effet, l'érosion aratoire et par la récolte de plantes à tubercules ou à racines peuvent également contribuer substantiellement à la perte en terre sur les parcelles agricoles. *In fine*, c'est donc la somme des contributions des différentes formes d'érosion qu'il conviendrait de comparer à la vulnérabilité.

## CONCLUSIONS

La cartographie du risque d'érosion hydrique diffuse et en rigoles résulte de la conjonction d'un aléa érosif et de la vulnérabilité. L'approche présentée ici valorise les bases de données disponibles en Wallonie en matière de climat, sols, topographie et données parcellaires. Le modèle empirique RUSLE est à la base du calcul de l'aléa érosif. Bien que comportant un certain nombre de limites, tant au niveau de son domaine d'application qu'au niveau de sa conception, le modèle RUSLE bénéficie d'une relative robustesse de par la large base de données qui lui est sous-jacente et une validation partielle pour la Wallonie. Il a permis de mettre en évidence que l'aléa érosif est potentiellement plus important dans le sud et l'est de la Wallonie en raison du relief plus accidenté et de la plus grande érosivité des pluies.

La définition des facteurs cultureux sur base des 8 cultures les plus répandues en Wallonie a permis de déterminer également l'érosion « effective » à l'échelle parcellaire pour les principales successions culturales. Cela a fait apparaître le rôle prépondérant de l'occupation du sol pour la gestion du risque érosif puisque l'érosion « effective » est moins importante dans le sud et l'est de la Wallonie, occupés majoritairement par des prairies, que dans le nord et l'ouest, où les grandes cultures dominent.

L'établissement de seuils d'érosion tolérable met en évidence que la vulnérabilité des sols wallons aux phénomènes d'érosion hydrique est très variable, en lien avec la profondeur effective des sols et leur charge caillouteuse. A l'avenir, il conviendrait d'affiner le calcul de ces seuils. Ceci nécessitera d'une part un enrichissement des bases de données pédologiques et d'autre part, une forte amélioration de notre capacité

à prédire les effets de l'érosion sur les différentes fonctions environnementales, sociales et économiques des sols.

Combinés aux valeurs d'érosion potentielle rendant compte de l'aléa érosion, les seuils d'érosion tolérable permettent de définir un risque d'érosion sous forme d'un indice d'érosion potentielle. Ce dernier constitue un outil permettant de sélectionner les parcelles les plus à risque et sur lesquelles des modes de gestion particuliers pourraient être imposés dans le cadre de la conditionnalité. Pour cela, il convient de définir une valeur seuil d'indice d'érosion potentielle qui, du point de vue de la conservation des sols et des pratiques agricoles observées, pourraient être fixée à 4. Cela implique toutefois une très forte augmentation du nombre et de la superficie de parcelles cultivées concernées par rapport à la méthodologie existante. La méthodologie présentée doit toutefois encore être améliorée en intégrant au calcul de l'érosion potentielle les phénomènes de redéposition au sein des parcelles. De plus, le calcul de l'érosion tolérable ne peut pas, pour l'instant, être effectué pour l'ensemble des parcelles en Wallonie (zones non cartographiées, imprécision sur la profondeur du sol), ce qui ne permet pas d'appliquer la méthode de l'indice d'érosion sur l'ensemble du territoire.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené dans le cadre du projet GISER (Gestion Intégrée Sol-Erosion-Ruissellement) financé par la Direction Générale de l'Agriculture des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGO3) que les auteurs tiennent à remercier. Les vues exprimées dans cette publication n'engagent que leurs auteurs.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bakker M., Govers G. et Rounsevell M.D.A., 2004 - The crop productivity-erosion relationship : an analysis based on experimental work. *Catena*, 57, pp. 55-76.
- Bielders C. L., Ramelot C. et Persoons, E., 2003 - Farmer perception of runoff and erosion and extent of flooding in the silt-loam belt of the Belgian Walloon Region. *Environmental Science & Policy*, 6, pp. 85-93.
- Bolinne, A., A. Laurant. Et Rosseau P., 1980. Provisional rain-erosivity map of Belgium. In : De Boodt M, Gabriels D (eds) *Assessment of erosion*. Wiley, Chichester, pp : 111-120.
- Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y., Van Oost K., Poesen J., Saby N., Gobin A., Vacca A., Quinton J., Auerswald K., Klik A., Kwaad F., Raclot D., Ionita I., Rejman J., Rousseva S., Muxart T., Roxo M. et Dostal T., 2010 - Rates and spatial variations of soil erosion in Europe : A study based on erosion plot data. *Geomorphology*, 122, pp. 167-177.
- Colinet G., Toussaint B., Laroche J., Goffaux M-J., Oger R., 2005. Base de données sol de REQUASUD - 2<sup>e</sup> synthèse. Gembloux : asbl REQUASUD, 36 p.
- Dautrebande S. et Deglin D., 2000 - Rapport synthétique relatif au modèle hydrologique distribué EPIC-MAILLE-HORAIRE. Gembloux : Faculté

- universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Unité d'Hydrologie & Hydraulique agricole. 35 p.
- Demarcin P., Degré A., Smoos A., et Dautrebande S., 2008 - Projet ERRUIS-SOL, Cartographie numérique des zones à risque de ruissellement et d'érosion des sols en Wallonie. Rapport final de convention DGO3-FUSAGx, Unité d'hydrologie et hydraulique agricole, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux, 2009. 59 p.
- De Ploey J., 1989 - A Soil Erosion Map for Western Europe. Catena Verlag.
- Desmet P. J. J. et Govers G., 1996 - A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, 5, pp. 427-433.
- Evrard O., Bielders C. L., Vandaele K., et Van Wesemael, B., 2007 - Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impact and potential control measures. *Catena* 70, pp. 443-454.
- Gabriels D., Ghekiere G., Schiettecatte W. et Rottiers I. 2003 - Assessment of USLE cover-management C-factors for 40 crop rotation systems on arable farms in the Kemmelbeek watershed, Belgium. *Soil & Tillage Research*, 74, pp. 47-53.
- Jäger, S., 1994 - Modelling Regional Soil Erosion Susceptibility Using the Universal Soil Loss Equation and GIS. In : Rickson, R.J. (ed). *Conserving Soil Resources. European Perspectives*, pp. 161-177. CAB International.
- Hall G.F, Daniels R.B. et Foss J.E., 1982 - Rate of soil formation and renewal in the USA. *In* Kral D.M. (ed.). *Determinants of soil loss tolerance. ASA special publication number 45. American society of agronomy, Soil science society of America.* p.22-39.
- Kazemi M.L, Dumenil L.C. et Fenton T.E., 1990 - Effects of accelerated erosion on corn yields of loess-derived and till-derived soils in Iowa. Unpublished technical report, Dept of Agronomy, Iowa State University, 102 p.
- Kirkby M. J., Irvine B. J., Jones R. J. A., Govers G. and PESERA team, 2008 - The PESERA coarse scale erosion model for Europe. I. - Model rationale and implementation. *European Journal of Soil Science*, 59, pp. 1293-1306.
- Kort J., Collins M. et Ditsch D., 1998 - A review of soil erosion potential associated with biomass crops. *Biomass and Bioenergy*, 14, pp. 351-359.
- Kral D.M., 1982 - Determinants of soil loss tolerance. ASA special publication number 45. American society of agronomy, Soil science society of America.
- Legrain X., Demarcin P., Colinet G. et Bock L., 2011 - Cartographie des sols en Belgique : aperçu historique et présentation des travaux actuels de valorisation et de révision de la Carte Numérique des Sols de Wallonie. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 15, pp. 647-656.
- Li L., Du S., Wu, L. et Liu G., 2009 - An overview of soil loss tolerance. *Catena* 78, pp. 93-99.
- Liégeois M., Wicherek S. et Amat J-P., 2004 - Réflexions sur la vulnérabilité à l'aléa érosion. *Cahiers Agricultures* 13, pp. 355-61.
- Lu D., Li G., Valladares S. et Batistella M., 2004 - Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia : Using RUSLE, Remote Sensing and GIS. *Land degradation & Development*, 15, pp. 499-512.
- Montier C., Daroussin J., King D. et Le Bissonnais Y., 1998 - Cartographie de l'aléa "Erosion des Sols" en France. INRA, Orléans.
- Morgan R.P.C., 2005 - *Soil Erosion and Conservation*. 3<sup>rd</sup> Edn. Longman Group, John Wiley & Sons Inc, New York., NY, 298 p.
- Prasuhn A., Liniger H., Gislser S., Herweg K., Candinas A. et Clément J-P., 2013 - A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as strategic policy support system. *Land use policy*, 32, pp. 281 - 291.
- Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K. et Yoder D. C., 1997 - Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agricultural Handbook* 703, US Department of Agriculture, Washington D. C. 384 p.
- Roose E., 1994 - Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO* 70, 420 p.
- Schumm S.A. et Harvey M.D., 1982 - Natural erosion in the USA. *In* Kral D.M. (ed.). *Determinants of soil loss tolerance. ASA special publication number 45. American society of agronomy, Soil science society of America.* p. 15-22.
- Terranova O., Antronico L., Coscarelli R. et Iaquinia P., 2009 - Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS : An application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology*, 112, pp. 228-245.
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A. et Montanarella L., 2000 - *Soil Erosion Risk Assessment in Europe*. EUR 19044 EN. European Commission Brussels.
- Van Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.R., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C. et Selvaradjou S-K., 2004 - Report of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection. Vol II, Erosion. European commission - Joint Research Center, ISPRA. 192 p.
- Verheijen F.G.A., Jones R.J.A., Rickson R.J. et Smith C.J., 2009 - Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94, pp. 23-38.
- Verstraeten G., Van Oost K., Van Rompaey A., Poesen J. et Govers G., 2001 - Integraal land - en waterbeheer in landelijke gebieden met het oog op het beperken van bodemverlies en moderoverlast (proefproject gemeente Gingelom). Rapport de recherche, KUL, Leuven.
- Verstraeten G., Poesen J., Goossens D., Gilljins K., Bielders C., Gabriels D., Ruyschaert G., Van Den Eeckhaut M., Vanwallegem T. et Govers G., 2006a - Belgium. Dans : Boardman, J. et Poesen J. (Eds.), *Soil erosion in Europe*. Wiley, Chichester, England, pp. 515-536.
- Verstraeten G., Poesen J., Demarée G. et Salles C., 2006b - Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium) : Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research*, 111, D22109.
- Wischmeier W.H. et Smith D., 1978 - Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* (United States Department of Agriculture) n° 537. Washington D. C. 58 p.
- Yoder D.C., Foster G.R., Weesies G.A., Renard K.G., McCool D.K. et Lown J. B., 2001 - Evaluation of the RUSLE Soil Erosion Model, in *Agricultural Non-Point Source Water Quality Model : Their use and application*. Dans : Parsons et al., (Eds), *Southern Cooperative Series Bulletin* 398, pp. 107-117.



