



Gembloux Agro-Bio Tech
Université de Liège

GISER

Détermination des parcelles à risque d'érosion hydrique

Une nouvelle approche est proposée afin de cibler au mieux les parcelles où le risque d'érosion hydrique est important. Cette approche se base sur la topographie (longueur, inclinaison des pentes, convergence des écoulements) mais aussi sur la sensibilité du sol à l'érosion et la force érosive de la pluie pour définir un aléa d'érosion. Le risque d'érosion est défini par rapport au taux d'érosion que le sol peut supporter. Il peut également être défini par rapport à la vulnérabilité des infrastructures et des personnes. Dans ce but, une méthodologie est ici proposée.

Convention GISER, UCL-ELLE et ULg-Gx ABT, financée par le SWP-DGO3-DDR.

Rapport « stand alone » mars 2015.

Résumé non technique disponible sur www.giser.be

Table des matières

Liste des abréviations	1
Objectifs et historique	3
Résultats	6
1. Cartographie de l'érosion effective parcellaire	6
1.1. Détermination du facteur cultural (FACTEUR C) des parcelles agricoles sur base des successions culturales de 2007 à 2009.....	6
1.1.1. Méthodologie pour la détermination du facteur cultural des principales rotations en Wallonie	6
1.1.2. Détermination des successions culturales 2007-2009.....	7
1.1.3. Détermination du facteur C des parcelles agricoles sur base des successions culturales de 2007 à 2009	10
1.3 Délivrables	18
2. Cartographie du risque d'érosion parcellaire du point de vue de la vulnérabilité des sols.	19
2.1. Définition des taux d'érosion maximum tolérable	19
2.1.1. Approches pour la définition d'un taux d'érosion maximum tolérable (Cordonnier et Bielders, 2007)	19
2.1.2. Présentation de la méthode USDA-NRCS et adaptation au contexte wallon.....	21
2.1.3. Détermination du taux d'érosion tolérable par type de sol	25
2.2. Détermination des parcelles à risque d'érosion via l'indice d'érosion.....	28
2.3 Délivrables	37
3. Méthodologie pour la cartographie des parcelles à risque d'érosion du point de vue de la vulnérabilité des biens et des personnes	38
3.1. Définition des zones vulnérables	38
3.2. Détermination du risque d'inondation boueuse en zone vulnérable	39
3.3. Détermination de l'aléa érosion et identification des parcelles problématiques	41
Conclusions	43
4.1. Cartographie de l'érosion effective parcellaire.....	45
4.2. Cartographie des parcelles à risque d'érosion du point de vue de la vulnérabilité des sols	45
4.3. Méthodologie pour la cartographie des parcelles à risque d'érosion du point de vue de la vulnérabilité des biens et des personnes.....	46

Bibliographie	45
----------------------	-----------

Annexes	47
----------------	-----------

Annexe 1 : Valeurs moyennes annuelles du facteur C toutes régions confondues et pour la Région Limoneuse ainsi que les valeurs de la littérature (Gabriels et al., 2003 et Verstraeten et al., 2001) pour les monocultures (GISER 2009-2011).	49
Annexe 2 : Valeurs moyennes annuelles du facteur C toutes régions confondues et pour la Région Limoneuse ainsi que les valeurs de la littérature (Gabriels et al., 2003 et Verstraeten et al., 2001) pour les rotations à 2 cultures (GISER 2009-2011).	50
Annexe 3 : Valeurs moyennes annuelles du facteur C toutes régions confondues et pour la Région Limoneuse ainsi que les valeurs de la littérature (Gabriels et al., 2003 et Verstraeten et al., 2001) pour les rotations à 3 cultures (GISER 2009-2011).	51

Liste des abréviations

a	Constante égale à 0.6
b	Constante égale à 0.061 h mm^{-1}
C_t	Capacité de transport [$\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]
CC	Canopy Cover (couverture par la canopée) [adimensionnel]
D	Taux de déposition [$\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]
e	Energie cinétique de la pluie [$\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$]
e_{\max}	Energie cinétique maximum dans la zone d'étude ($29 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ pour la Belgique centrale)
E	Perte en sol annuelle moyenne à long terme [$\text{t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$]
E_e	Perte en sol annuelle moyenne effective à long terme [$\text{t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$], équivaut à E
E_p	Perte en sol potentielle annuelle moyenne à long terme [$\text{t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$]
EI_n	Erosivité moyenne à long terme de la pluie pour la période n considérée [$\text{MJ.mm ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$]
EI_{tot}	Erosivité moyenne à long terme de la pluie [$\text{MJ.mm ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$]
F_s	Flux de sédiments [$\text{kg m}^{-1} \text{ h}^{-1}$]
I	Intensité de la pluie [mm h^{-1}]
I_{30}	Intensité maximale de la pluie de durée de 30 min pour l'événement [mm h^{-1}]
IE_e	Indice d'érosion effective [adimensionnel]
IE_p	Indice d'érosion potentielle [adimensionnel]
k_t	Coefficient de capacité de transport [kg m^{-3}]
k_{tc}	coefficient de capacité de transport [m]
R	Erosivité de la pluie [$\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$]
K	Erodibilité du sol [$\text{t h mm}^{-1} \text{ MJ}^{-1}$]
LS	Facteur topographique [adimensionnel, >0]
C	Facteur cultural [adimensionnel, [0-1]]
P	Facteur "mesures anti-érosives" [adimensionnel, [0-1]]
PLU	Prior Land Use (occupation du sol antécédente) [adimensionnel]
q	Débit par unité de largeur [$\text{m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ h}^{-1}$]
h	Hauteur de pluie de l'événement [mm]

R10	Code attribué aux parcelles agricoles présentant des pentes supérieures ou égales à 10% sur au moins 50 ares ou 50% de leur superficie
R_e	Erosivité de l'événement climatique [$\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$]
R GISER	Code attribué aux parcelles agricoles présentant une érosion potentielle supérieure ou égale $120 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sur au moins 50 ares ou 50% de leur superficie
S_f	Flux de sédiments [$\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]
SAU	Surface Agricole Utile
SC	Surface Cover (couverture par les débris végétaux) [adimensionnel]
SLR	Soil Loss Ratio [adimensionnel]
SM	Soil Moisture (humidité du sol) [adimensionnel]
SR	Surface Roughness (rugosité du sol) [adimensionnel]
t	Durée de la pluie [h]
T	Erosion tolérable [$\text{t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$]
T_c	Capacité de transport [$\text{kg m}^{-1} \text{ h}^{-1}$]
V_f	Vitesse de sédimentation des particules de sol [m h^{-1}]
Θ	Pente [m m^{-1}]

Objectifs et historique.

Au vu des taux d'érosion parfois considérables observés en Wallonie, se pose la question à la fois de la protection de la ressource sol mais également de la prévention des impacts environnementaux et sociétaux qui y sont associés comme la dégradation de la qualité des cours d'eau, 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-érosive, il convient d'identifier les parcelles les plus à risque d'érosion hydrique. Jusqu'à présent en Wallonie les parcelles problématiques étaient identifiées sur base du code R10 mis en place par le Service public de Wallonie (SPW).

Une parcelle classée en code R10 (ou R15) présente plus de 50% de sa surface et/ou 50 ares avec des pentes de plus de 10% (ou 15%). Cette approche basée uniquement sur la pente ne permet toutefois pas de cibler de manière pertinente les parcelles où l'aléa érosion est le plus élevé car elle néglige les autres facteurs intervenant dans le processus de l'érosion hydrique. La Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) permet de calculer la quantité moyenne annuelle de terre perdue à long terme par ruissellement diffus (érosion en rigoles et érosion inter-rigoles) en tenant compte de cinq facteurs qui influencent l'érosion par ruissellement (Equation 1, Wischmeier et Smith, 1978).

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

Équation 1

où E est la perte en sol annuelle moyenne à long terme [$t \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$], R l'érosivité de la pluie [$\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$], K l'érodibilité du sol [$t \text{ h mm}^{-1} \text{ MJ}^{-1}$], LS le facteur topographique (adimensionnel, >0), C le facteur cultural (adimensionnel, $[0-1]$) et P le facteur "mesures anti-érosives" (adimensionnel, $[0-1]$). Les limites inhérentes à ce modèle ont été discutées entre autres par Yoder et al. (2001) et Roose (1994).

Suite à une demande du SPW, il a été décidé dans le cadre de la convention GISER 2009-2011 de développer en priorité une méthodologie de calcul et une cartographie de l'érosion potentielle à l'échelle parcellaire (Biolders et al., 2011). L'érosion potentielle est définie comme l'érosion moyenne annuelle attendue au regard des caractéristiques physiographiques de la parcelle et de son milieu (topographie, type de sol et climat). L'érosion potentielle est définie par l'Equation 2. Les mesures anti-érosives et l'assolement (respectivement facteur P et facteur C ; Equation 1) sont considérés comme des moyens permettant de réduire l'érosion potentielle.

$$E_{pot} = R \cdot K \cdot LS$$

Équation 2

Ce calcul de l'érosion potentielle a été automatisé à l'échelle de la Wallonie avec une résolution spatiale de 100 m^2 . Chaque parcelle a été considérée comme hydrologiquement isolée, c'est-à-dire que les flux provenant de l'amont ne sont pas pris en compte dans le calcul. L'objectif était de calculer les pertes en terre inhérentes à la parcelle elle-même, sans lui imputer la responsabilité de problèmes survenant en amont. Une classification des parcelles à risque d'érosion a été proposée au SPW (GISER 2009-2011 ; Biolders et al., 2011). Dans un souci de continuité avec le code R10, la valeur seuil du taux d'érosion potentielle a été fixée dans un premier temps à $120 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. En effet, ce seuil permettait de classer en code R GISER une surface agricole totale équivalente à celle identifiée antérieurement par la méthode du code R10. Ainsi, si sur au moins 50 ares ou 50 % de la superficie de la parcelle le taux d'érosion hydrique

potentielle est supérieur à la valeur seuil de $120 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, la parcelle se voit attribuer le code R GISER. La Figure 1 présente la carte résultante sur base du parcellaire 2009.

Le code R GISER permet de cibler les parcelles où les taux d'érosion sont potentiellement élevés en fonction de leurs caractéristiques physiographiques, mais il ne renseigne pas sur la situation de fait liée à l'utilisation de la terre. Il est toutefois possible de déterminer, pour chaque parcelle, le taux d'érosion effective qui rend compte de la situation de fait en fonction du type de culture. **L'un des objectifs de la convention 2011-2015 était donc de cartographier l'aléa d'érosion effective à l'échelle parcellaire.**

Les aléas d'érosion parcellaire potentielle ou effective ne renseignent pas sur le risque d'érosion. En effet, 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). Une caractérisation de la vulnérabilité est donc nécessaire. Dans le cas de l'érosion hydrique, la vulnérabilité peut-être à la fois abordée du point de vue de la conservation des sols mais également du point de vue des biens et des personnes situées en aval et pouvant subir des coulées boueuses. **La convention GISER 2011-2015 avait donc aussi pour objectifs de cartographier les parcelles à risque d'érosion, d'une part**

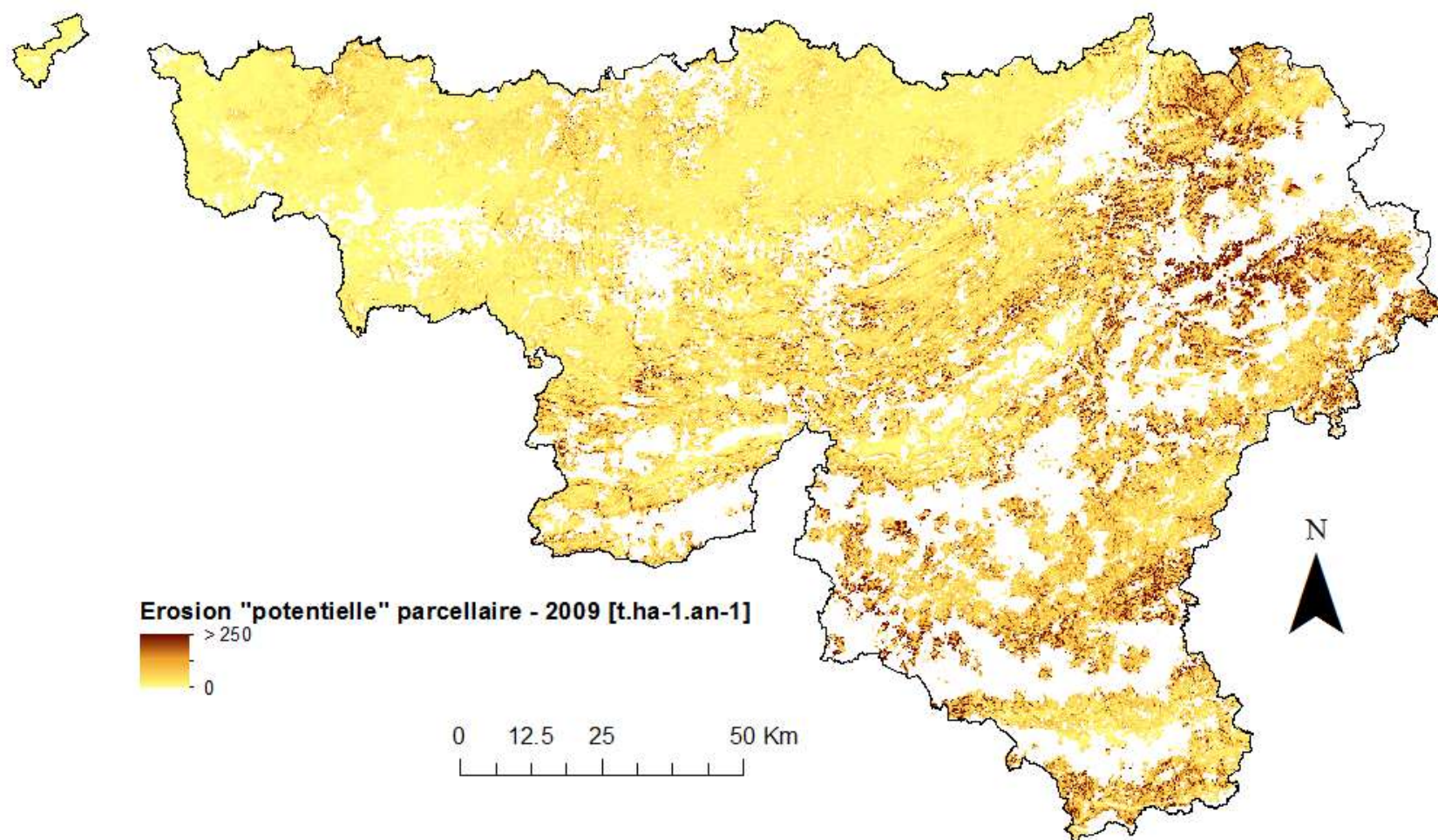


Figure 1 - Erosion hydrique potentielle calculée sur base du parcellaire 2009 (GISER 2009-2011 ; Bielders et al., 2011)

Résultats.

1. Cartographie de l'érosion effective parcellaire

Pour calculer le taux d'érosion effective, il est nécessaire d'intégrer à l'Equation 2 le facteur cultural C.

1.1. Détermination du facteur cultural (FACTEUR C) des parcelles agricoles sur base des successions culturales de 2007 à 2009

1.1.1. Méthodologie pour la détermination du facteur cultural des principales rotations en Wallonie

Ce travail a été effectué lors de la convention GISER 2009-2011 (Biielders et al., 2011). Un rappel est ici effectué. Pour de plus amples informations, le lecteur est invité à consulter le rapport de la convention GISER 2009-2011. Le facteur C rend compte de l'impact de la culture et des pratiques culturales sur les pertes en sol. Il est fonction du rapport de pertes en terre (Soil Loss Ratio ; SLR) de la culture pondéré par l'érosivité de la pluie (Equation 3, Yoder et al., 1997).

$$C = \frac{\sum (SLR_n \cdot EI_n)}{EI_{tot}} \quad \text{Équation 3}$$

EI_n est l'érosivité moyenne à long terme de la pluie pour la période n considérée [$\text{MJ.mm ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$] (Verstraeten et al., 2006), EI_{tot} est l'érosivité totale moyenne à long terme de la pluie sur une année [$677 \text{ MJ.mm ha}^{-1}.\text{h}^{-1} \text{ an}^{-1}$], et SLR_n (adimensionnel) est le Soil Loss Ratio, c'est-à-dire le rapport de pertes en terre pour la période considérée. Le SLR rend compte de la diminution de pertes en sol pour un contexte donné par rapport à un sol nu travaillé dans le sens de la pente et ayant une rugosité aléatoire égale à 0.24 pouce (6 mm). Il varie entre 0 et 1, et est défini comme le produit de cinq facteurs (Equation 4).

$$SLR = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR \cdot SM \quad \text{Équation 4}$$

Les facteurs PLU (Prior Land Use = occupation du sol antécédente), CC (Canopy Cover = couverture par la canopée), SC (Surface Cover = couverture par les débris végétaux), SR (Surface Roughness = rugosité du sol) et SM (Soil Moisture = humidité du sol), tous adimensionnels, doivent être déterminés expérimentalement.

Les valeurs du facteur C pour les 27 rotations triennales les plus répandues en Wallonie et leurs variantes ont été calculées (GISER 2009-2011 ; Biielders et al., 2011). Les variantes tiennent compte de l'ordre de succession des cultures et du type de gestion de l'interculture. En l'absence de culture de couverture hivernale, deux hypothèses ont été formulées concernant la gestion de l'interculture avant la mise en place d'une culture de printemps. La première hypothèse est un labour d'automne effectué début novembre. Le taux de couverture du sol par les résidus provenant de la culture précédente est considéré

constant jusqu'à cette date. La seconde hypothèse est un labour de printemps réalisé début mars. Le taux de couverture du sol par les résidus de la culture précédente décroît à partir de la 1ère décade de novembre. Les tableaux présentant les résultats sont fournis en annexe (Annexes 1 à 3).

1.1.2. Détermination des successions culturelles 2007-2009

Etant donné le nombre important de libellés de culture au niveau du parcellaire du SIGEC pour les années 2007 à 2009 (80), il a été décidé de créer 11 grandes classes sur base des similitudes qui peuvent exister au niveau des cultures ou des pratiques culturelles.

Pour les cultures suivies lors de la convention GISER 2009-2011 (Biielders et al., 2011), lorsque différentes variantes existaient pour une même culture, celles-ci ont été regroupées (p.ex., betteraves fourragères et betteraves sucrières = 'betteraves' ; Tableau 1). Une classe 'Prairie' a été formée avec toutes les variantes de type prairie. Une classe a également été créée pour les occupations du sol de type 'Arbre'. Pour finir tout ce qui ne rentre dans aucune des catégories définies précédemment est assigné à la classe 'Autre' (Tableau 1 et Tableau 2). La classe 'Autre' représente environ 5% de la surface agricole utile (SAU). Les libellés de culture qui dominent cette classe sont les cultures maraichères et les céréales de printemps.

Pour chaque parcelle, la culture a été extraite pour les années en 2007, 2008 et 2009 et reclassée. Bien que le parcellaire puisse évoluer d'une année sur l'autre, l'année 2009 a été prise comme année de référence en termes de limites parcellaires. Pour chacune des trois années, la culture est extraite au centroïde de la parcelle. L'information sur l'occupation du sol pour les trois années a ensuite été fusionnée afin de déterminer la rotation. Les rotations faisant intervenir au moins une culture de type 'Autre' ont toutes été regroupées. Celles faisant intervenir au moins une culture de type 'Arbres' également. Ceci fournit pour 2007-2009, 572 rotations.

Tableau 1 : Reclassification des libellés des cultures des parcelles du SIGEC 2007 à 2009 (1ère partie)

Libellé SIGEC de la culture	Pourcentage moyen de la SAU de 2007 à 2009		Pourcentage moyen de la SAU hors prairies et assimilés de 2007 à 2009		Reclassé en
<i>Maïs ensilage</i>	8.15	8.71	17.13	18.30	Maïs
<i>Maïs grain</i>	0.56		1.17		
<i>Pomme de terre de consommation</i>	3.44	3.60	7.23	7.56	Pomme de terre
<i>Pomme de terre (plants)</i>	0.14		0.29		
<i>Pomme de terre féculière</i>	0.01		0.03		
<i>Pommes de terre</i>	0.00		0.00		
<i>Betterave fourragère</i>	0.11	7.38	0.23	15.53	Betterave
<i>Betterave sucrière</i>	6.25		13.15		
<i>Chicorée</i>	0.00		0.00		
<i>Chicorée à inuline</i>	1.02		2.14		
<i>Chicorée à café</i>	0.00		0.01		
<i>Froment d'hiver</i>	18.48	18.48	38.84	38.84	Froment
<i>Orge d'hiver</i>	5.03	5.03	10.57	10.57	Escourgeon
<i>Epeautre</i>	1.46	1.46	3.07	3.07	Epeautre
<i>Colza et navette d'hiver</i>	1.34	1.34	2.81	2.83	Colza
<i>Colza fourrager</i>	0.00		0.00		
<i>Colza et navette de printemps</i>	0.01		0.01		
<i>Lin textile</i>	1.32	1.32	2.77	2.77	Lin
<i>Lin oléagineux</i>	0.00		0.00		
<i>Prairie permanente</i>	43.53	52.41	X	X	Prairie
<i>Pâturage à statut particulier</i>	0.29		X		
<i>Prairie temporaire</i>	7.70		X		
<i>Tournière enherbée</i>	0.89		X		
<i>Cultures forestières à rotation courte</i>	0.01	0.25	0.02	0.53	Arbres
<i>Boisement</i>	0.01		0.01		
<i>Terres non agricoles en couvert forestier</i>	0.01		0.02		
<i>Noisetier</i>	0.00		0.00		
<i>Noyer</i>	0.00		0.01		
<i>Sapins de Noël</i>	0.02		0.04		
<i>Cultures fruitières pluri-annuelles</i>	0.20		0.41		
<i>Vignes</i>	0.00		0.00		
<i>Cultures fruitières annuelles</i>	0.01		0.02		

Tableau 2 : Reclassification des libellés des cultures des parcelles du SIGEC 2007 à 2009 (2nde partie)

Libellé SIGEC de la culture	Pourcentage moyen de la SAU de 2007 à 2009	Pourcentage moyen de la SAU hors prairies et assimilés de 2007 à 2009	Reclassé en
<i>Froment de printemps ou froment alternatif</i>	0.24	0.51	Autre
<i>Orge de printemps</i>	0.53	1.12	
<i>Seigle d'hiver</i>	0.02	0.04	
<i>Seigle de printemps</i>	0.00	0.01	
<i>Avoine</i>	0.57	1.20	
<i>Triticale</i>	0.25	0.53	
<i>Sarrasin</i>	0.00	0.00	
<i>Autres céréales (Sorgho, millet, alpeste et blé dur)</i>	0.01	0.02	
<i>Mélange de céréales</i>	0.25	0.52	
<i>Tournesol</i>	0.00	0.00	
<i>Soja</i>	0.00	0.00	
<i>Pois (récoltés en sec)</i>	0.15	0.32	
<i>Fèves et féveroles (récoltées en sec)</i>	0.03	0.07	
<i>Lupin doux</i>	0.01	0.03	
<i>Trèfle</i>	0.05	0.10	
<i>Luzerne</i>	0.13	0.28	
<i>Autres fourrages</i>	0.45	0.95	
<i>Ortie</i>	0.01	0.02	
<i>Mélange de graminées et légumineuses</i>	0.00	0.00	
<i>Couvert naturel</i>	0.06	0.13	
<i>Couvert de graminées</i>	0.30	0.64	
<i>Couvert de légumineuses</i>	0.01	0.03	
<i>Graminées fourragères uniquement pour la production de semences bio</i>	0.00	0.00	
<i>Couvert graminées + légumineuses</i>	0.22	0.48	
<i>Autres couverts permettant l'utilisation de droits de jachères</i>	0.02	0.05	
<i>Autres couverts semés</i>	0.01	0.03	
<i>Couvert à base d'un mélange certifié</i>	0.05	0.12	
<i>Mélange jachère faune</i>	0.01	0.02	
<i>Chanvre non textile</i>	0.00	0.00	
<i>Chanvre textile</i>	0.00	0.00	
<i>Angélique</i>	0.01	0.01	
<i>Cultures non alimentaires</i>	0.00	0.00	
<i>Chou rouge</i>	0.00	0.00	
<i>Plantes aromatiques</i>	0.00	0.00	
<i>Cultures horticoles non comestibles</i>	0.01	0.03	
<i>Pois (non récoltés en sec)</i>	0.01	0.01	
<i>Fèves et féveroles (non récoltées en sec)</i>	0.01	0.01	
<i>Haricots</i>	0.00	0.00	
<i>Cultures maraîchères</i>	1.65	3.46	
<i>Cultures maraîchères sous verre</i>	0.00	0.00	
<i>Pépinières de plants fruitiers ou de plantes ornementales</i>	0.02	0.04	
<i>Autres couvertures végétales</i>	0.04	0.09	
<i>Autres couverts permettant l'utilisation de droits ordinaires</i>	0.02	0.04	
<i>Tabac</i>	0.00	0.00	
<i>Pépinière de plants forestiers</i>	0.00	0.00	
<i>Plantes médicinales</i>	0.00	0.00	
<i>Miscanthus</i>	0.01	0.02	
<i>Houblon</i>	0.00	0.00	

1.1.3. Détermination du facteur C des parcelles agricoles sur base des successions culturelles de 2007 à 2009

Un travail de reclassification a été effectué sur les 572 rotations obtenues. Les rotations à 2 cultures (A et B), qui présentent sur trois ans 1A et 2B ont été regroupées et différenciées des cas de type 1B et 2A. En effet, pour une rotation à 2 cultures, le facteur C n'est différent que dans les cas 1A-2B et 1B-2A et cela quel que soit l'ordre de succession des cultures pour chacune de ces configurations. Pour les rotations à trois cultures, il n'existe que deux combinaisons possibles sur trois ans qui induisent des différences de facteur C. Cependant, ces différences sont de l'ordre du centième. Il a donc été décidé de regrouper les deux combinaisons possibles et d'attribuer une valeur de facteur C moyenne. La valeur de facteur C attribuée à ces rotations est recherchée parmi les 27 principales rotations et variantes définies dans le cadre de la convention GISER 2009-2011 (Biielders et al., 2011).

Pour une occupation du sol de type 'Prairie' sur 3 années, la valeur du facteur C attribuée est de 0.01 (Wischmeier et Smith, 1978). Lorsqu'une ou plusieurs 'Prairies' interviennent dans une rotation avec une culture dont le facteur C est connu, le facteur C de la rotation est défini sur base de la méthodologie employée dans la convention GISER 2009-2011 (Biielders et al., 2011). Les rotations avec deux 'Prairie' et un 'Autre' se sont vues attribuer la valeur de 0.15. Ceci revient à considérer la valeur du facteur C pour 'Autre' à 0.43. Ce chiffre correspond à la valeur moyenne pondérée du facteur C en terme de surface pour les cultures suivies lors de la convention GISER 2009-2011 (Biielders et al., 2011).

Les rotations contenant un élément 'Arbres' (924 parcelles) sont quasi systématiquement des rotations de type 'Arbres'-Arbres-'X'. La valeur attribuée est une valeur moyenne de 0.20 sur base des facteurs C proposés pour les rotations de type 'Arbres' par Wischmeier et Smith (1978). Ceci correspond à un facteur C pour la catégorie Arbre de 0.10 et un facteur de C de 0.43 (moyenne pondérée du facteur C en terme de surface pour les cultures suivies lors de la convention GISER 2009-2011 ; Biielders et al., 2011) pour l'occupation 'X'.

Parmi les rotations restantes, celles composées de cultures dont le facteur C a été établi lors de la convention GISER 2009-2011 (Biielders et al., 2011) et qui représentaient au moins 1% des rotations parcellaires, ont été recherchées. Pour ces rotations, le facteur C a été déterminé suivant l'Equation 3. Pour toutes les rotations ne répondant à aucun des critères précédents, la détermination du facteur C n'a pu être réalisée. Ceci concerne 47832 parcelles sur 275001 (17.4%) et correspond à 121767 ha sur 770309 ha (15.8%). Les principales rotations pour lesquelles le facteur C n'a pu être déterminé sont les rotations faisant intervenir des cultures maraichères ou des céréales de printemps.

Les 51 rotations pour lesquelles le calcul du facteur C est possible avec les données disponibles sont présentées au Tableau 3 et à la Figure 2. Les rotations avec prairie, avec arbres ou à cultures d'hiver sont celles présentant les facteurs C les plus favorables. Pour les rotations avec prairies, ces valeurs varient de 0.01 (prairie 'permanente' sur 3 ans) à 0.15 (2 années de prairies et 1 année de culture 'Autre'). Pour les rotations avec arbres, le facteur C vaut 0.20. Pour les combinaisons de céréales d'hiver ou de colza, le facteur C se situe aux alentours de 0.37-0.40. Les rotations les moins favorables combinent au moins

deux cultures de printemps et se situent aux alentours de 0.50. La carte de la Wallonie des facteurs C est fournie à la Figure 3.

Tableau 3 : Valeurs du facteur C des 51 rotations pour lesquelles le calcul peut être effectué sur base des données actuellement disponibles

<u>Rotation</u>	<u>Facteur C</u>	
Monoculture		
Prairies	0.01	
Maïs	0.55	
Froment	0.42	
Orge (Escourgeon)	0.35	
Rotation à deux cultures		
Froment-Betterave	1F-2B	0.38
	1B-2F	0.40
Froment-Maïs	1M-2F	0.46
	2M-1F	0.50
Froment-Pomme de terre	1Pdt-2F	0.45
	1F-2Pdt	0.49
Froment Lin	1L-2F	0.48
	1F-2L	0.55
Froment-Colza	1C-2F	0.40
	1F-2C	0.38
Froment-Escourgeon	1E-2F	0.40
	1F-2E	0.37
Escourgeon-Pomme de terre	1Pdt-2E	0.40
	1E-2Pdt	0.46
Escourgeon-Lin	1L-2E	0.42
	1E-2L	0.51
Escourgeon-Colza	1C-2E	0.35
	1E-2C	0.36
Epeautre-Betterave	1B-2E	0.41
	1E-2B	0.39
Epeautre-Maïs	1M-2E	0.48
	1E-2M	0.51
Epeautre-Pomme de terre	1Pdt-2E	0.47
	1E-2Pdt	0.50
Betterave - Pomme de terre	1Pdt-2B	0.43
Maïs-Pomme de terre	1Pdt-2M	0.55
Maïs-Prairie	1P-2M	0.31
	1M-2P	0.12
Froment-Prairie	1F-2P	0.12
Escourgeon-Prairie	1E-2P	0.10
Prairie-Autre	1A-2P	0.15
Rotations à trois cultures		
Froment-Betterave-Pomme de terre	0.44	
Froment-Betterave-Maïs	0.44	
Froment-Betterave-Lin	0.46	
Froment-Maïs-Pomme de terre	0.50	
Escourgeon-Betterave-Pomme de terre	0.41	
Escourgeon-Betterave-Lin	0.43	
Escourgeon-Betterave-Pomme de terre	0.47	
Escourgeon-Froment-Pomme de terre	0.43	
Escourgeon-Froment-Lin	0.45	
Escourgeon-Froment-Colza	0.38	
Escourgeon-Froment-Betterave	0.37	
Escourgeon-Froment-Maïs	0.43	
Froment-Epeautre-Maïs	0.47	
Maïs-Froment-Prairie	0.23	
Pomme de terre-Froment-Lin	0.52	
Rotations avec Arbres		
Rotations avec Arbres	0.20	

Facteurs C des 51 rotations

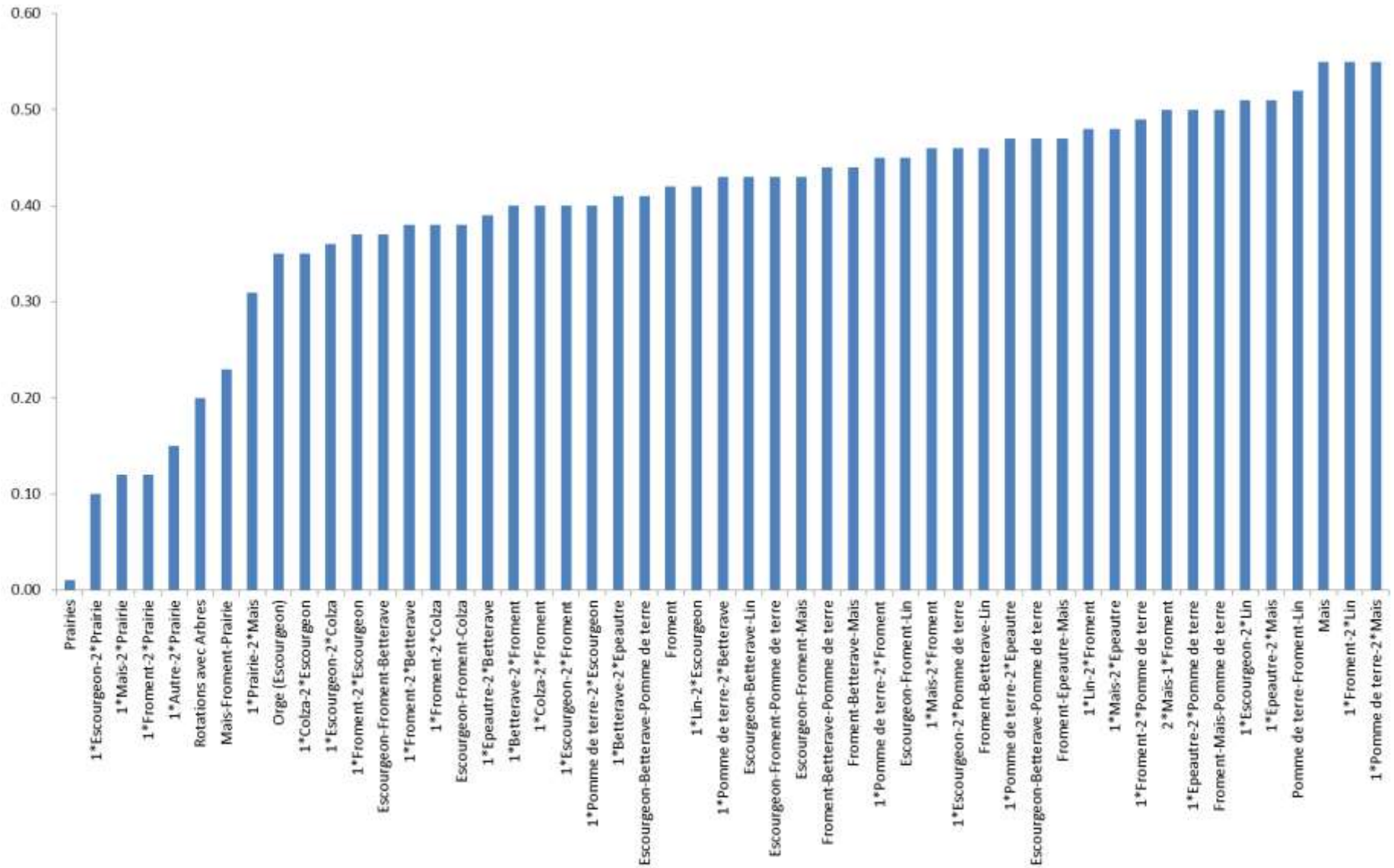


Figure 2 : Facteurs c des 51 rotations, classées par ordre croissant

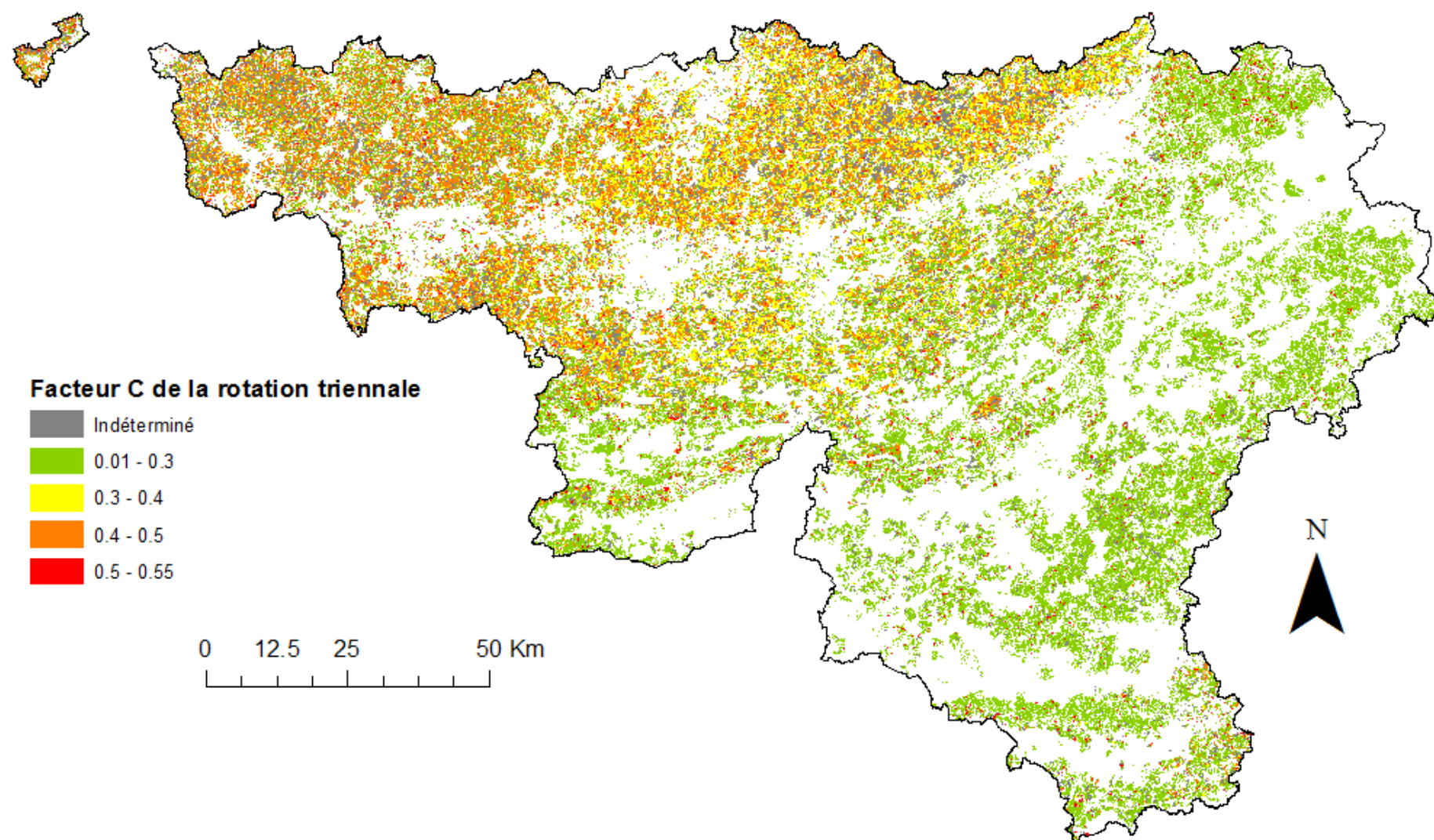


Figure 3 : Carte des valeurs du facteur C pour les rotations 2007-2009. Indéterminé = rotations faisant intervenir au moins une culture pour laquelle le facteur C ne peut pas être déterminé compte tenu des données disponibles actuellement

Le facteur C relatif aux successions culturales de plus de 80 % des parcelles en Wallonie a pu être déterminé. Cette carte indique clairement une scission entre d'une part le Sud de la Wallonie avec une domination des valeurs de facteur C les plus faibles en raison des nombreuses prairies, et d'autre part le Nord avec les valeurs de facteur C les moins favorables en raison de la présence de grandes cultures.

1.2. Cartographie de l'érosion hydrique effective des parcelles agricoles en Wallonie

La combinaison des valeurs d'érosion potentielle et des valeurs du facteur C permet d'établir la carte d'érosion effective pour la Wallonie. Celle-ci montre une scission entre le Nord et le Sud du pays (Figure 4). Cependant, la tendance observée pour l'érosion potentielle (Figure 1) est totalement inversée puisque le sud qui présentait une érosion potentielle élevée en raison de pentes plus importantes et d'un climat moins favorable, est caractérisé par une érosion effective faible comparé au Nord occupé par les grandes cultures industrielles. Près de 70 % des parcelles qui se situent dans l'ensemble Fagne, Famenne, Ardenne, Haute Ardenne, Région Jurassique et Région Herbagère subissent moins de $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de perte en sol contre seulement 35% pour l'ensemble Région Limoneuse, Région Sablo-Limoneuse, Campine Hennuyère, Condroz (Figure 5). Le pourcentage de parcelles qui présentent des pertes en sol comprises entre $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ est de 38% dans le Nord de la Wallonie, contre 15 % dans le Sud. Pour finir, la proportion de parcelles avec plus de $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de perte en sol se situe pour les 2 ensembles aux alentours de 4%. En moyenne, la valeur d'érosion effective parcellaire est de $4.6 \pm 8.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sur l'ensemble de la Wallonie. La différence est en moyenne de $2 \text{ t a}^{-1} \text{ an}^{-1}$ entre les parcelles situées dans le Sud (Fagne, Famenne, Haute-Ardenne, Ardenne, Région Jurassique, Région Herbagère, $3.5 \pm 9.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) 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.

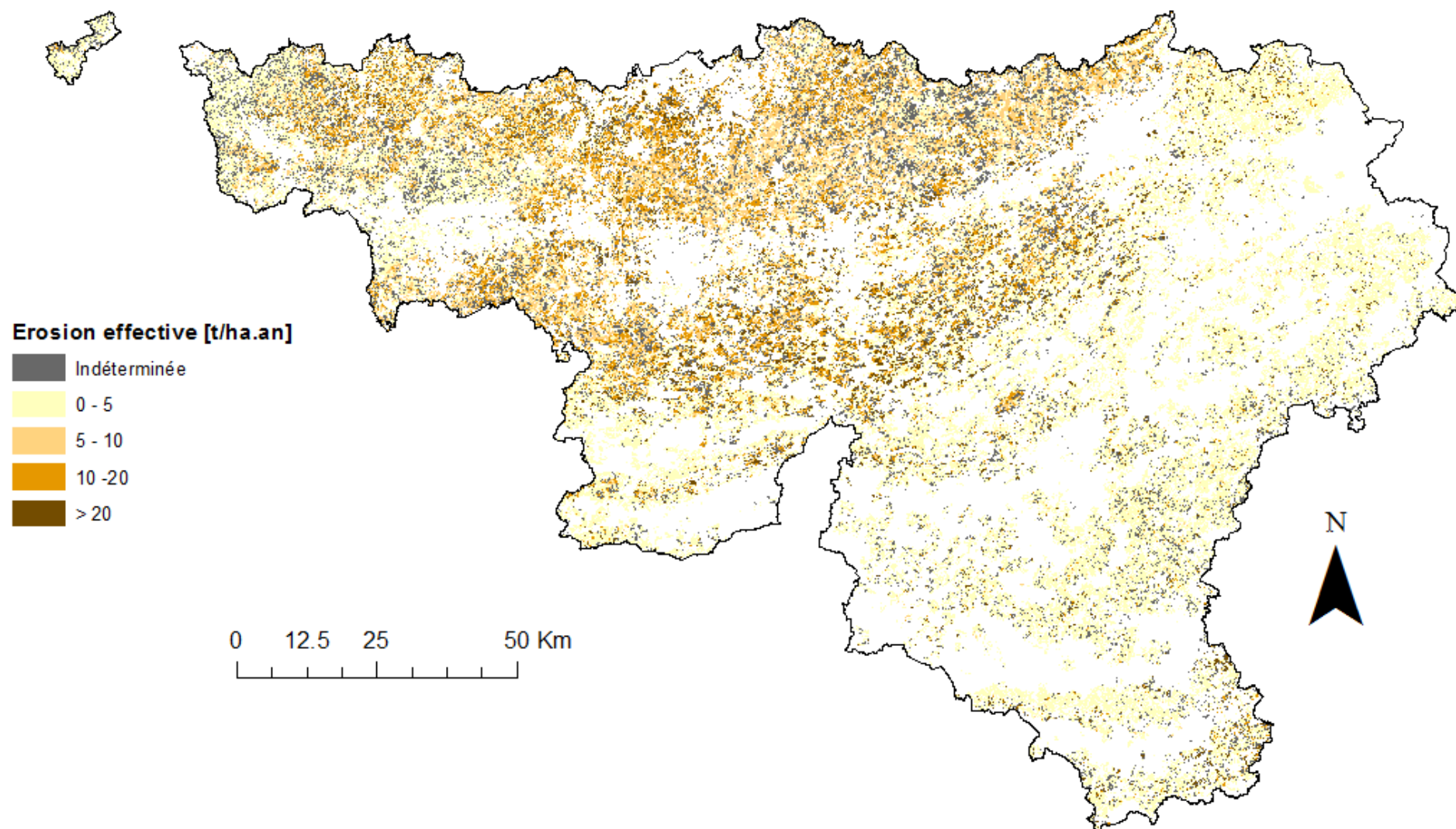


Figure 1 : Cartographie de l'érosion hydrique effective moyenne parcellaire sur base des rotations 2007-2009

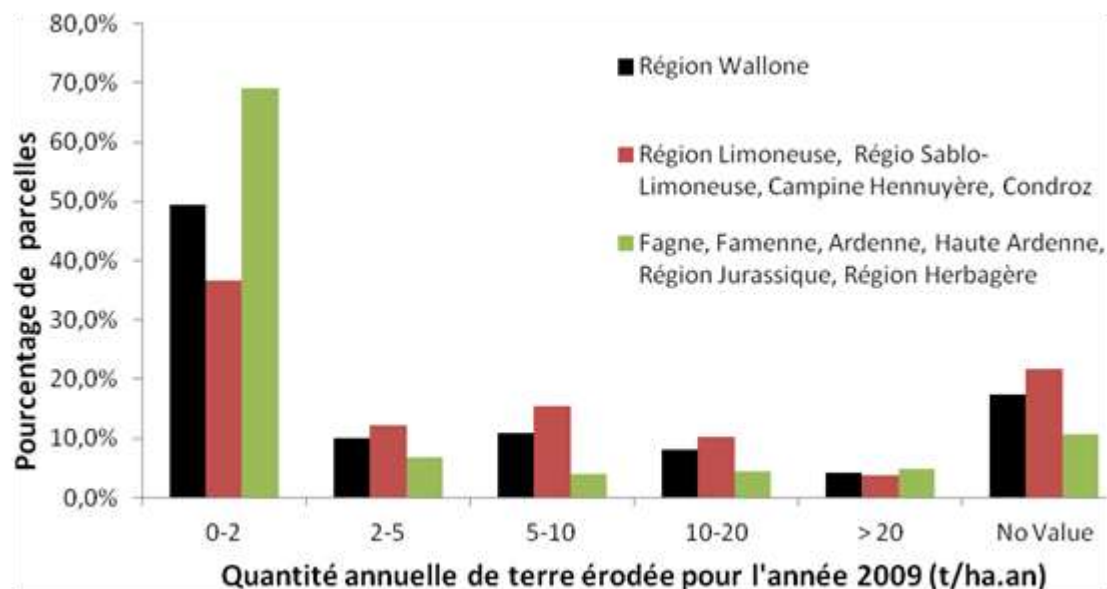


Figure 5 : Distribution des parcelles selon la quantité annuelle de terre perdue par érosion hydrique (t/ha an) pour l'année 2009 pour des parcelles considérées comme hydrologiquement isolées, sans prendre en compte le dépôt et les mesures anti-érosives.

1.3 Délivrables

Différents livrables ont été remis au SPW concernant cette section. Il s'agit d'un rapport intermédiaire de la convention GISER. Il est accessible via la Direction du Développement Rural du Département de la Ruralité et des Cors d'eau de la Direction Générale Opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement. Différentes cartes ont également été fournies au SPW pour une mise en ligne sur le Géoportail de la Wallonie. Il s'agit du facteur cultural des rotations 2007-2009 au format shapefile et de l'érosion effective avec une résolution de 10 m pour l'année 2009 au format raster. Pour finir, des fiches résultats connexes sont disponibles sur le site www.giser.be.

2. Cartographie du risque d'érosion parcellaire du point de vue de la vulnérabilité des sols.

Le risque est fonction de l'intensité d'un aléa et de la vulnérabilité de la cible affectée par cet aléa. L'approche proposée ici est de combiner les taux d'érosion parcellaire (= aléa érosion) à des seuils d'érosion tolérable (= vulnérabilité du sol) sous forme d'un indice d'érosion potentielle (= risque d'érosion). Dans cette approche, le risque est donc quantifié sous l'angle de la dégradation de la ressource en sol et non pas du point de vue des dégâts causés en aval par l'érosion (voir §3). L'objectif est ici de protéger le sol, au même titre que l'air ou l'eau, car il remplit de nombreuses fonctions essentielles au bon fonctionnement de nos écosystèmes. La vitesse de formation des sols étant très faible, cette ressource est souvent considérée comme une ressource non-renouvelable. Les phénomènes d'érosion, par les quantités de terre importantes mises en jeu, peuvent induire des dysfonctionnements au niveau des fonctions du sol, entre autres suite à une diminution importante de l'épaisseur du sol à certains endroits. Il est donc nécessaire de limiter les phénomènes d'érosion, notamment sur les parcelles agricoles, par l'adoption de pratiques adéquates. Pour ce faire, il convient de définir pour chaque type de sol un seuil d'érosion maximale tolérable en relation avec ses propriétés et ses qualités.

Dans la convention GISER 2009-2011 (Bièlders et al., 2011), une méthodologie avait été proposée pour établir le seuil d'érosion tolérable en Wallonie par type de sol, en prenant en compte l'épaisseur du sol, l'épaisseur de l'horizon humifère et la charge caillouteuse. Suite à une collaboration étroite avec l'équipe du Projet de cartographie numérique des sols de Wallonie (PCNSW), cette méthodologie a dû être révisée pour tenir compte des informations pertinentes effectivement disponibles pour l'ensemble des sols de Wallonie. Ainsi, l'épaisseur de l'horizon humifère n'a pas été retenue car en zone de culture il s'agit de l'horizon Ap correspondant à la profondeur de labour. Cette épaisseur est donc constante, quel que soit le type de sol. Par ailleurs, le critère d'épaisseur du sol a été élargi à toutes les contraintes pédologiques susceptibles de limiter la profondeur racinaire. Le présent chapitre présente le fruit de cette collaboration. Après un bref rappel des différentes approches utilisables pour définir un seuil d'érosion tolérable, des seuils de taux d'érosion maximum tolérable seront présentés par type de sol.

2.1. Définition des taux d'érosion maximum tolérable

2.1.1. Approches pour la définition d'un taux d'érosion maximum tolérable (Cordonnier et Bièlders, 2007)

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 se situent entre 0.1 et 0.5 t ha⁻¹ an⁻¹ en Grande Bretagne, 0.03 à 3 t ha⁻¹ an⁻¹ aux USA, 0.1 à 2 t ha⁻¹ an⁻¹ en Chine. Les taux d'érosion naturelle dépassent donc rarement les 1 t ha⁻¹ an⁻¹ mais peuvent néanmoins dans certains cas atteindre des valeurs plus élevées (jusqu'à 2-3 t ha⁻¹ an⁻¹). Dans cette approche, on considère le sol comme étant un héritage, fruit d'une très longue évolution. Cette 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 Wallonie se pose essentiellement sur les terres de culture. Même s'il faut reconnaître que, contrairement aux autres processus modifiés par les pratiques agricoles et influençant le fonctionnement des sols, l'érosion est le seul processus qui conduit directement à une réduction du volume de sol exploitable, est-il raisonnable d'attendre de l'agriculture qu'elle maintienne les taux d'érosion à un niveau proche de l'érosion naturelle, si l'on sait que ce critère n'est pas respecté pour d'autres processus qui influencent également le fonctionnement, et donc l'évolution, des sols mais de façon moins visible ? 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. Verheijen et al. (2009) ont compilé les données relatives aux taux de formation des sols en Europe. Selon le type de sol, les taux de formation sont compris entre 0.4 et 1.3 t ha⁻¹ an⁻¹. Van Camp et al. (2004) estiment que tout taux d'érosion > 1 t ha⁻¹ 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), les premiers 25 mm d'un sol peuvent se former en une cinquantaine d'année (soit 0.5 mm an⁻¹), mais il faut 150 000 ans pour que ce même sol atteigne une épaisseur de 2.5 m (soit 0.02 mm an⁻¹ en moyenne). Pimentel et al. (1976, in Schumm et Harvey, 1982) rapportent qu'en condition de pratiques agricoles normales, il faut 100 ans pour former 25 mm de sol (0.25 mm an⁻¹). En condition de gestion idéale, ce taux peut passer à 0.8 mm an⁻¹. Par ailleurs, le taux de régénération de l'horizon humifère superficiel est plus rapide que le taux d'altération du sol. Hall et al. (1982) rapportent des valeurs de vitesses de régénération de l'horizon humifère qui correspondraient à plusieurs millimètres par an. Cet horizon contribue vraisemblablement aux diverses fonctions des sols de façon plus que proportionnelle à son épaisseur. 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 naturels 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 4ème 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 production agricole ou forestière (Kral, 1982), cette vision n'est pas nécessairement anthropocentrique, puisque le terme 'besoins' peut englober tous les besoins des écosystèmes (Verheijen et al., 2009) et pas seulement la production de biomasse pour satisfaire les besoins humains. Cependant, les connaissances nécessaires pour l'expression quantitative des fonctions du sol restent très partielles et 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. Néanmoins, la fonction de production agricole et l'impact de l'érosion sur celle-ci reste de loin la fonction sur laquelle le plus de connaissances sont disponibles.

Aux Etats-Unis, l'USDA-NRCS (United States Department of Agriculture – National Resources Conservation Service) propose des taux d'érosion tolérable qui permettent de maintenir un haut niveau de productivité agricole pouvant être soutenu économiquement et dans le temps. 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. En l'état actuel, cette méthode a été retenue et adaptée afin d'être implémentée en Wallonie sur base des informations de la carte des sols.

2.1.2. Présentation de la méthode USDA-NRCS et adaptation au contexte wallon

Comme indiqué au paragraphe précédent, cette méthode consiste à attribuer à chaque type de sol une valeur d'érosion tolérable fonction de la présence de contraintes pouvant limiter le développement des racines et *in fine* la croissance des cultures. Cette valeur est fixée sur base de connaissances expert (« expert knowledge ») de sorte à permettre de maintenir un haut niveau de productivité agricole qui soit à la fois économiquement soutenable et pérenne.

Les sols sont tout d'abord 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. Le groupe 2 reprend les sols qui présentent une contrainte modérée pour le développement des racines ou qui n'a pas un caractère permanent. Pour finir le groupe 3 reprend les contraintes qui, dans certaines conditions climatiques ou via des pratiques culturales adaptées, n'ont pas d'impact sur les niveaux de productivité.

Une fois les sols répartis au sein des trois groupes, une valeur d'érosion tolérable est attribuée en fonction de la profondeur à laquelle se trouve la contrainte (Tableau 4). Pour une même épaisseur de sol,

la tolérance est croissante lorsque l'on passe du groupe 1 au groupe 3. L'adaptation de la méthode USDA-NRCS repose sur les trois points suivants :

- a. Pour chaque sol, la profondeur « utile », c'est-à-dire la profondeur jusqu'à laquelle la racine peut croître sans rencontrer de contrainte significative, est déterminée. Afin de faire le lien avec l'information issue de la carte des sols du PCNSW, les classes de profondeur ont été adaptées (0-20 cm, 20-40 cm, 40-80 cm, 80-125 cm, >125 cm).
- b. Les valeurs de références d'érosion tolérable sont celles du groupe de sol n°2 de la méthode USDA-NRCS. Ces valeurs ont été retenues car elles sont plafonnées par la valeur maximale de $12.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et elles diminuent de manière approximativement linéaire en fonction de la classe de profondeur utile du sol.
- c. Enfin, le volume utile du sol est corrigé sur base de sa charge caillouteuse (particules > 2 mm). Cette information est disponible en trois classes : 5-15%, 15-50% et >50%. Cette correction pour la charge caillouteuse n'est pas effectuée par l'USDA, mais elle semble néanmoins pertinente. En effet, le volume réellement exploitable du sol diminue proportionnellement à la charge caillouteuse. Trois situations sont considérées en fonction de la teneur en cailloux. Si la charge caillouteuse est inférieure à 15%, alors l'impact sur le volume utile de sol est faible et chaque classe de profondeur se voit attribuer une valeur de référence d'érosion tolérable. Si la charge caillouteuse est comprise entre 15 et 50 %, alors le seuil tolérable doit être diminué car le volume utile de sol est moindre. Cette diminution a été fixée à 1/3 de la valeur de référence. Si la charge caillouteuse est supérieure à 50% alors la valeur référence d'érosion est diminuée de moitié.

Tableau 4: Valeurs recommandées aux USA pour l'attribution des taux d'érosion tolérable (USDA-NRCS, 1999 dans Li, 2009)

Profondeur de la contrainte (cm)	Erosion annuelle tolérée (t ha^{-1})		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
0-25	2.5	2.5	7.5
25-50	2.5	5.0	7.5
50-100	5.0	7.5	10.0
100-150	7.5	10.0	10.0
> 150	12.5	12.5	12.5

Le Tableau 5 présente les valeurs d'érosion tolérable proposées, établies en fonction des caractéristiques du sol sur base de cette méthodologie. Sur demande de la cellule GISER, l'équipe du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW) a établi des tables permettant de déterminer sur base de codes, pour chaque type de sol, l'épaisseur du profil, la charge caillouteuse, la nature et la profondeur d'une contrainte potentielle, où encore la nature du substrat. Parmi les contraintes renseignées, seuls les gley (Figure 6, codes 10, 31, 41) et fragipan (Figure 6, codes 20, 42, 52) empêchent la croissance des racines et limitent donc la profondeur utile du sol.

Tableau 5: Propositions de valeurs d'érosion tolérable pour la Wallonie selon les caractéristiques du sol

Profondeur utile (cm)	Non caillouteux	Caillouteux (15-50%)	Très caillouteux (>50%)
Erosion annuelle tolérée (t ha ⁻¹)			
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

Présence d'une contrainte	10	horizon réduit (gley)
	20	horizon induré (fragipan)
	30	sol devenant plus fin (textures Z ou S) ou plus lourd (textures L, A, E, U ou G) en profondeur
	31	horizon réduit (gley) et sol devenant plus lourd (textures L, A, E, U ou G) en profondeur
	40	sol devenant plus grossier ou plus léger en profondeur
	41	horizon réduit (gley) et sol devenant plus grossier ou plus léger en profondeur
	42	horizon induré (fragipan) et sol devenant plus léger en profondeur
	50	sol devenant plus caillouteux en profondeur
	52	horizon induré (fragipan) et sol devenant plus caillouteux en profondeur

Figure 6: Codes attribués pour déterminer la nature d'une contrainte pédologique (source : PCNSW)

Pour chaque type de sol, la profondeur utile du sol a été déterminée sur base de la profondeur à laquelle se retrouve le gley ou le fragipan ou alors, si aucune contrainte n'est présente, sur base de la profondeur du profil de sol telle que recensée à la Figure 7. A chaque profondeur de sol est associé un code de 00 à 15. La répartition de ces codes de profondeur entre les classes de profondeur du Tableau 2 est la suivante :

- 0-20 cm : code de profondeur 14.
- 20-40 cm : codes de profondeur 10 et 13.
- 40-80 cm : codes de profondeur 07 et 09. La profondeur 20-80 cm est volontairement ramenée à la classe la plus élevée de manière à ne pas pénaliser les parcelles qui se trouveraient dans la tranche supérieure de cette gamme d'épaisseur.
- 80-125 cm : codes de profondeur 04 à 06. Les profondeurs 20-125 cm et 40-125 cm sont volontairement ramenées à la classe de profondeur la plus élevée de manière à ne pas pénaliser les parcelles qui se trouveraient dans la tranche supérieure de ces gammes d'épaisseur.
- >125 cm : codes 00 et 01.
- Indéterminé : codes de profondeur 02, 03 et 15, à savoir respectivement « 0 à > 125 cm », « < 125 cm » et « variable ».

Pour les zones de colluvions et d'alluvions, la profondeur de sol renseignée est celle relative à l'épaisseur des sédiments. Cependant, si ces sédiments recouvrent un profil de sol non érodé et qui ne présente pas

de contrainte, alors la profondeur utile du sol peut être considérée comme > 125 cm. Cette correction est apportée si pour ce type de sol, la nature du substrat est codifiée en 00, 10 ou 11 (Figure 8). Les substrats de type Loess (code 20) ou autres matériaux meubles (codes 21, 22, 31..) ne sont pas considérés comme du sol différencié et structuré bien que potentiellement les racines puissent y croître. Ils constituent donc la limite inférieure du profil utile de sol. Chaque sol est ensuite classé selon sa charge caillouteuse et se voit attribuer une valeur d'érosion tolérable sur base des valeurs renseignées au Tableau 5.

		SUBSTRAT	VAR_DEV_1	VAR_DEV_4	VAR_MAT_1	VAR_MAT_3	PHASE_1	PHASE_2	PHASE_5
00	> 125 cm		0	1			0		
01	généralement > 125 cm						- (. . p ch ou G . p .)		
02	0 à > 125 cm			-			- (G . p .)		
03	< 125 cm				a	(x)			
04	> 80 cm	(.)-	0_1				0_1		
05	80-125 cm	(.) ou . 1u	1				1		
06	généralement > 80 cm		- (p)						
07	> 40 cm						0_1_2		
08	40-125 cm	(.)2- (.)-		2			1_2 2	3	
09	40-80 cm	. 2 ou . 2u	(c)				2 ou 7	3	
10	< 40 cm			3					
11	20-125 cm	(.)-					2_3 (G) 2_4 (G)		
12	20-80 cm	. 2_3 (G) . 2_4 (G)					2_3 (G) 2_4 (G)		
13	20-40 cm	. 3 (G) . 4 (G)					3 (G) 4 (G)	5	
14	< 20 cm						6		
15	variable	. - ou . /							P/T/U

combinaison de deux symboles (SUBSTRAT et PHASE_1)

Figure 7: codes de profondeur (colonne 1) assignés par l'équipe du PCNSW aux informations sur la profondeur extraites de la carte numérique des sols de Wallonie (colonne 2). Ces codes renseignent sur la profondeur du profil de sol ou sur la profondeur (tableau 4) à laquelle une contrainte est retrouvée. Les colonnes suivantes sont liées à la symbolique de la carte des sols et contiennent l'information sur la profondeur

Nature du matériau sous-jacent au sol (Prof < 125 cm)	00	- (prof. sol > 125 cm)
	10	Horizon B textural (enfoui)
	11	Horizon B textural (enfoui) ou prof. sol > 125 cm
	20	Loess
	21	Matériau meuble autochtone
	22	Limon d'altération
	30	Substrat non défini (meuble ou cohérent)
	31	Substrat meuble
	32	Substrat meuble ou prof. sol > 125 cm
	33	Substrat caillouteux/graveleux
	34	Substrat caillouteux/graveleux ou prof. sol > 125 cm
	35	Substrat cohérent
	36	Substrat cohérent ou prof. sol > 125 cm
	98	Inconnu
	99	Inconnu ou prof. sol > 125 cm

Figure 8 : Codes attribués pour la nature du matériau sous-jacent au sol dans les zones de colluvions ou d'alluvions (source : PCNSW)

2.1.3. Détermination du taux d'érosion tolérable par type de sol

Sur base de la méthodologie exposée ci-dessus, chaque type de sol s'est vu attribuer une valeur d'érosion tolérable. Le Tableau 6 reprend les pourcentages de chacune des classes d'érosion tolérable pour les sols de Wallonie.

Tableau 6: Répartition des sols de Wallonie selon la valeur d'érosion tolérable

Erosion tolérable (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	% de la surface totale concerné
<i>Indéterminée</i>	14.5%
1.5	0.6%
2.5	0.3%
3.5	8.0%
5.0	21.5%
6.5	7.9%
7.5	8.5%
10.0	12.9%
12.5	25.8%
<i>TOTAL</i>	100%

La valeur d'érosion tolérable 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 et de zones urbaines (57%), le reste étant constitué de sols cartographiés mais pour lesquelles l'information sur la profondeur est imprécise (variable, 0 à > 125 cm, < 125 cm) ou indisponible. Les classes 1.5 et 2.5 t ha⁻¹ an⁻¹ sont très peu représentées, respectivement 0.64 et 0.33%. Il a donc été décidé de regrouper ces deux classes en une classe unique dont la valeur d'érosion tolérable est 2 t ha⁻¹ an⁻¹. Par conséquent, les valeurs renseignées dans le Tableau 5 ont été adaptées (Tableau 7).

Tableau 7: Valeurs finales d'érosion tolérable pour les sols de Wallonie selon leur profondeur utile et la charge caillouteuse. Les valeurs entre parenthèses ne sont pas représentées en Wallonie

Profondeur utile (cm)	Non caillouteux	Caillouteux (15-50%)	Très caillouteux (>50%)
	Erosion annuelle tolérée (t ha ⁻¹)		
0-20	2.0	2.0	(1.0)
20-40	5.0	3.5	2.0
40-80	7.5	5.0	3.5
80-125	10.0	6.5	5.0
> 125	12.5	(8.5)	6.5

Les Régions Limoneuse et Sablo-Limoneuse présentent les taux d'érosion tolérable les plus élevés (Figure 9). La Haute-Ardenne, la Région Herbagère, le Condroz et la Famenne montrent des seuils d'érosion tolérable relativement faibles en moyenne. Ceci s'explique notamment par la nature des sols qui, en Région Limoneuse et Sablo-Limoneuse, sont des sols profonds et à bon drainage ne présentant donc pas de nappe temporaire ou permanente. De plus, ces sols ont une charge caillouteuse quasiment nulle. Le Tableau 8 montre la distribution des différentes valeurs d'érosion tolérable au sein de la SAU sur base du parcellaire du SIGEC 2009.

La proportion de la surface pour laquelle aucune valeur d'érosion tolérable ne peut être attribuée est faible (5,13 %) et se répartit de manière équivalente entre les surfaces en culture et les surfaces en prairie. Sans surprise, les surfaces présentant une valeur d'érosion tolérable de 2 t ha⁻¹ an⁻¹ sont très faibles et correspondent majoritairement à des surfaces en prairie car elles sont très peu aptes à la culture. Les surfaces avec une valeur de 12.5 t ha⁻¹ an⁻¹ dominent largement avec un pourcentage de la SAU avoisinant 41%, dont près de 33% en culture. La valeur de 5 t ha⁻¹ an⁻¹ est attribuée à 17% de la SAU, dont environ 1/3 en culture et 2/3 en prairie. La valeur de 10 t ha⁻¹ an⁻¹ est se retrouve pour moitié sur des terres en culture et pour moitié en prairie et représente environ 15% de la SAU. Les valeurs de 3.5, 6.5 et 7.5 représentent chacune environ 5.5-8.5% de la SAU, majoritairement en prairie.

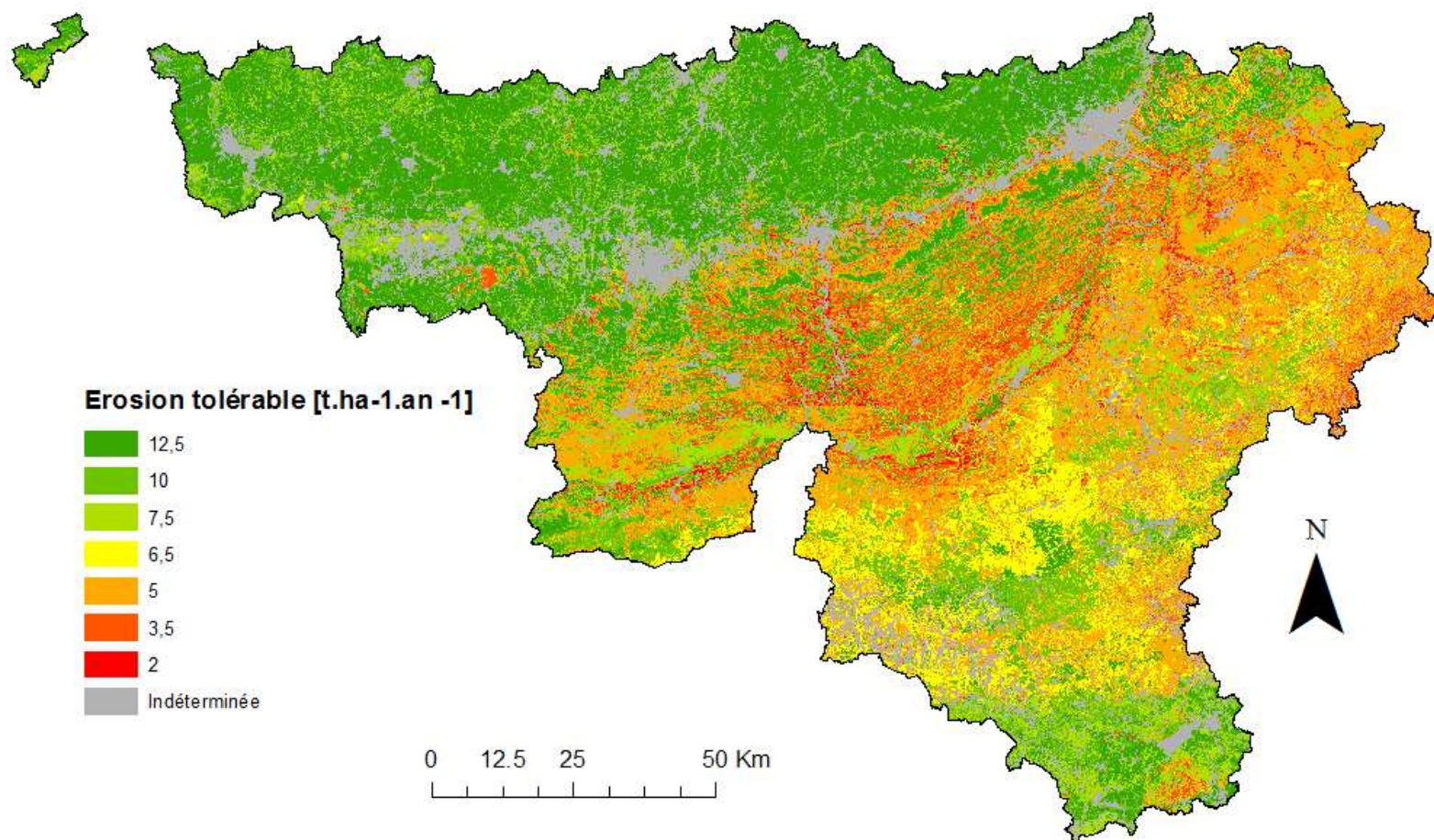


Figure 9 : Seuils d'érosion tolérable pour la Wallonie

Tableau 8: Distribution de la SAU en Wallonie sur base du parcellaire du SIGEC 2009 selon la valeur d'érosion tolérable

Erosion tolérable (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	Cultures	Prairies	SAU totale
	%		
<i>Indéterminée</i>	2.50	2.63	5.13
2.0	0.10	0.25	0.35
3.5	2.87	4.50	7.37
5.0	5.94	11.24	17.18
6.5	1.72	4.05	5.77
7.5	3.58	4.82	8.40
10.0	6.91	8.27	15.18
12.5	32.81	7.80	40.61
TOTAL	56.43	43.57	100

2.2. Détermination des parcelles à risque d'érosion via l'indice d'érosion

Pour une parcelle donnée et hydrologiquement isolée, le risque d'érosion potentielle est calculé pour chaque pixel de la parcelle comme suit (Equation 5):

$$IE_p = E_p \cdot \frac{1}{T}$$

Equation 5

où IE_p est le risque d'érosion exprimé sous forme d'un indice d'érosion potentielle adimensionnel [-], E_p [t ha⁻¹ an⁻¹] est l'érosion potentielle et représente l'aléa érosif, et $1/T$ est la vulnérabilité du sol avec T [t ha⁻¹ an⁻¹] le seuil d'érosion tolérable. Cette approche est identique à celle mise en œuvre par l'USDA-NRCS (Kort, 1998). Plus IE_p est élevé, plus le risque de dégradation du sol est élevé.

Avec cette méthodologie, chaque pixel d'une parcelle 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_p à la parcelle, et l'attribution d'un niveau de risque en fonction de la valeur d' IE_p parcellaire obtenue. L' IE_p parcellaire est établi sur base de la relation entre la superficie cumulée et l'indice IE_p (Figure 10). Par cohérence avec l'approche utilisée antérieurement par le SPW pour identifier le risque parcellaire, le risque parcellaire est la valeur de l' IE_p pixelaire telle que 50% de la parcelle (parcelles < 1

ha) ou 50 ares (parcelles ≥ 1 ha) aient une valeur supérieure à cette valeur d' IE_p (Figure 10). Ainsi, pour les parcelles dont la superficie dépasse 1 ha, on prend en compte les 50 ares les plus à risques.

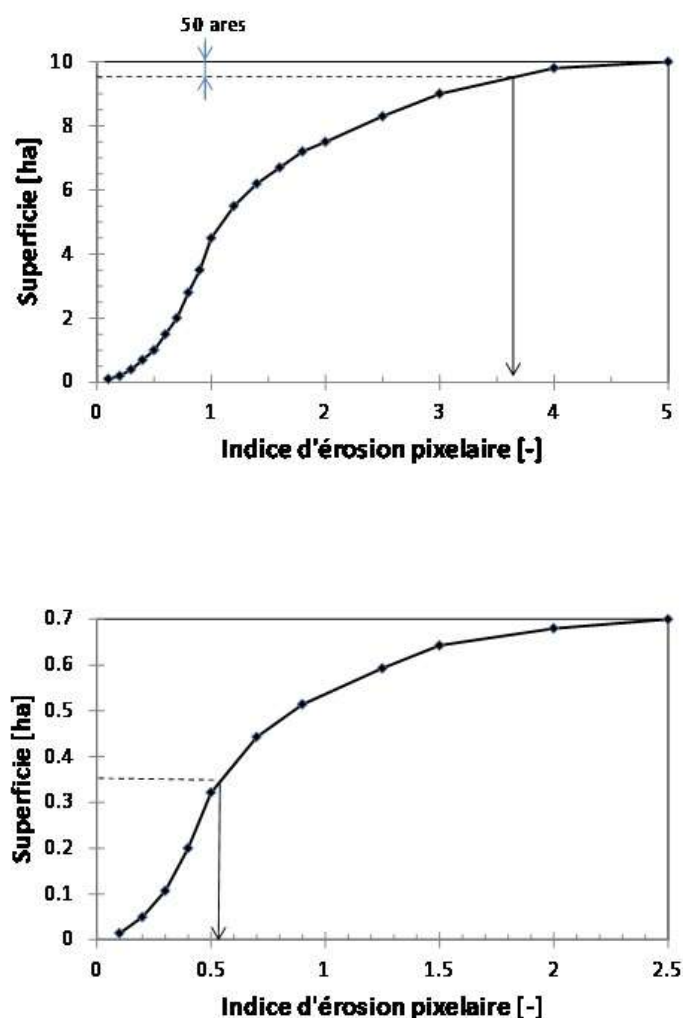


Figure 10 : Méthode d'identification de l'indice d'érosion potentielle (IE_p) parcellaire sur base de la distribution cumulée de la superficie parcellaire en fonction de la valeur de l'indice d'érosion potentielle pixelaire. En haut, cas d'une parcelle ≥ 1 ha ; le trait tireté horizontal marque la valeur 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. La valeur de l' IE_p parcellaire est indiquée par une flèche dans les deux cas.

Pour les parcelles de petites dimensions (≤ 1 ha), c'est la moitié supérieure de la superficie qui est prise en compte. Cette distinction entre grande et petite parcelle évite de classer systématiquement les parcelles de petite dimension en classe de faible risque. En effet, pour des parcelles ≤ 0.5 ha, la règle appliquée aux grandes parcelles impliquerait un IE_p parcellaire nul. Sur base de l' IE_p parcellaire, un niveau de risque a été défini comme suit : $IE_p \leq 1$: risque faible ; $1 < IE_p \leq 2$: risque moyen ; $2 < IE_p \leq 4$: risque élevé ; $4 < IE_p \leq 8$: risque très élevé ; $IE_p > 8$: risque extrême. Rappelons que l' IE_p ne prend pas en compte la réduction de l'érosion par la couverture végétale et les pratiques agricoles.

La Figure 11 montre la répartition géographique de l'indice d'érosion potentielle parcellaire (Equation 5). 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 par les plus faibles valeurs d'érosion tolérable, liées à la plus faible profondeur des sols et à leur charge caillouteuse plus importante. De plus, le relief dans cette partie de la Wallonie est plus accidenté et l'érosivité des pluies y est plus élevée, conduisant 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. Ces valeurs élevées d'indice d'érosion sont liées à la texture des sols dans cette région qui les rend particulièrement sensibles à l'érosion, ainsi qu'à un relief relativement plus accidenté que dans la Région Limoneuse. 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. On retrouve des indices d'érosion inférieurs à 2, et même à 1, en Campine hennuyère et dans la partie occidentale de la Région Limoneuse.

Afin de conserver une certaine continuité avec le système actuel (R10/R15), 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 9 montre l'impact du choix de la valeur seuil de l' IE_p sur le nombre de parcelles définies comme à risque d'érosion ainsi que la superficie correspondante.

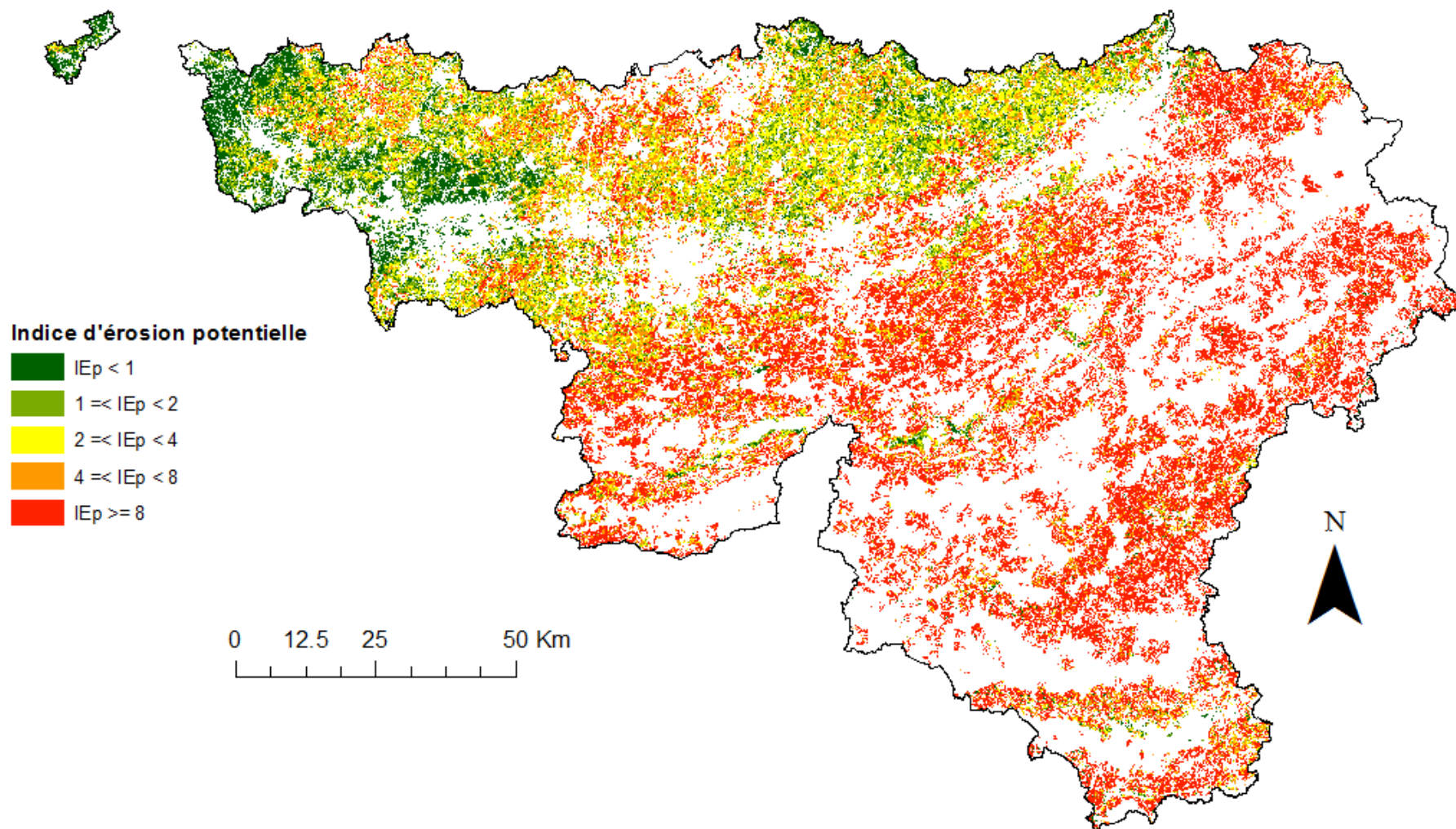


Figure 11 : Indices d'érosion potentielle (IE_p) des parcelles déclarées en 2009

Tableau 9: Nombre de parcelles et surface définies comme à risque d'érosion selon la valeur seuil de l'indice d'érosion potentielle (IE_p). Calculs effectués sur base du parcellaire 2009.

Indice d'érosion supérieur à	Nombre de parcelles concernées	Surface concernée (ha)
2	171823	597051
4	126710	464536
6	102321	390140
8	85976	343699
10	73799	308744
12	64276	280449
14	56458	256305
16	49876	235106
18	44425	216528
20	39839	200482

Par analogie avec l'équation 5, on peut définir un indice d'érosion effective tel que :

$$IE_e = E_e \cdot \frac{1}{T} \quad \text{Equation 6}$$

où IE_e est le risque d'érosion exprimé sous forme d'un indice d'érosion effective adimensionnel [-], E_e [t ha⁻¹ an⁻¹] est l'érosion effective et T représente l'aléa érosif effectif.

En toute logique, il conviendrait de choisir la valeur seuil de l'IE_p de telle façon à ce que l'indice d'érosion effective (IE_e) soit ≤ 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% (soit un facteur C = 0.25, valeur plutôt optimiste), cela reviendrait à classer toutes les parcelles ayant un IE_p > 4 comme étant à risque. Avec ce critère, 464 000 ha de SAU serait classée à risque, soit un peu plus de 61 % de la SAU totale.

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 85 976 parcelles pour une surface totale de 343 699 ha (45% de la SAU). Cependant, pour environ 5% de la SAU, cet indice ne peut être calculé car le seuil d'érosion tolérable ne peut y être déterminé sur base des informations disponibles actuellement. La surface définie comme à risque d'érosion est donc probablement sous-estimée. Avec cette valeur seuil de l'indice (IE_p = 8), le nombre de parcelles et la surface identifiés à risque d'érosion sont 52 % plus élevés que pour le critère actuellement en vigueur (56 093 parcelles et 221 280 ha sur base du parcellaire 2009). Les parcelles à risque couvrent quasiment tout le sud du pays jusqu'au Condroz avec quelques spots en Régions Limoneuse et Sablo-Limoneuse. 56 072 de ces parcelles, soit 65 %, sont des prairies permanentes ou des pâturages à statut particulier qui totalisent une surface de 223 005 ha. Cette proportion passe à près de 75% lorsqu'on y ajoute les prairies temporaires. Pour un indice d'érosion de 8, très peu de parcelles sous culture sont donc ciblées et très peu le sont dans les zones de

grandes cultures (Régions Limoneuse et Sablo-Limoneuse), bien qu'on y constate des problèmes d'érosion importants pouvant générer des inondations boueuses. Cela provient du fait que la cartographie actuelle du risque érosif est basée sur la vulnérabilité du sol et non sur la vulnérabilité des infrastructures. Dans les zones de grandes cultures, et certainement dans les Régions Limoneuse et Sablo-Limoneuse, la vulnérabilité des sols est actuellement faible car les sols présentent une profondeur généralement > 125 cm et une faible charge caillouteuse.

La Figure 12 présente la répartition géographique des valeurs de l'Indice d'érosion effective parcellaire (Equation 6). L'érosion effective est obtenue en multipliant l'érosion potentielle par un facteur cultural (C) défini sur base des rotations 2007-2009 lors de la convention GISER 2009-2011 (Biielders et al., 2011). On constate que les valeurs d'indice d'érosion effective sont pour la plupart inférieures à 2, avec des valeurs inférieures à 1 en particulier en Ardenne et Haute-Ardenne, caractérisées par une forte proportion de prairies, ainsi qu'en Campine Hennuyère et dans la partie occidentale de la Région Limoneuse qui présentent des valeurs d'indice d'érosion potentielle faibles (Figure 11). Le Condroz présente une grande proportion de parcelles avec un indice d'érosion effective supérieur à 2. Ceci s'explique à la fois par la plus grande vulnérabilité des sols dans cette région, conduisant à des valeurs d'érosion tolérable pour la plupart faibles, à un relief accidenté entraînant une érosion potentielle pouvant être élevée, auxquelles 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 en Région Limoneuse.

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 applique un indice d'érosion de 8 en Wallonie, ceci revient à accepter que 90% des parcelles puissent avoir un taux d'érosion effectif jusqu'à 3 fois supérieur au seuil de vulnérabilité dans les grandes régions agricoles (Régions Limoneuse et Sablo-Limoneuse). Cette estimation se base sur le 10^{ème} percentile des valeurs du facteur C des rotations dans chaque région (Tableau 10). 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 pour ces parcelles. Si l'on considère les facteurs cultureux des rotations par région agricole (Tableau 10), l'utilisation d'une valeur seuil de 4 pour l'indice d'érosion potentielle reviendrait à classer comme 'à risque' les parcelles ayant une érosion effective au moins 1.6 à 1.8 fois supérieure à l'érosion tolérable pour les régions où les cultures industrielles ou le maïs sont fortement représentées (Régions Limoneuse et Sablo-Limoneuse, Campine, Condroz, Fagne, Famenne, Régions Jurassique et Herbagères) si la rotation mise en place fait partie des rotations médiane (Percentile 50). Dans toutes ces régions à l'exception des Régions (Sablo-)Limoneuses, le rapport entre l'érosion potentielle et l'érosion tolérable pourrait être réduit d'un facteur 6 à 8 en pratiquant l'une des rotations les plus favorables, c'est-à-dire en installant une prairie 2 années sur 3 (Percentile 10 ; Tableau 2). Pour les régions présentant peu de cultures comme l'Ardenne et la Haute-Ardenne, la simple mise en place des rotations les plus courantes sur ces parcelles permettrait de réduire d'un facteur 6 à 8 le rapport entre l'érosion potentielle et l'érosion tolérable.

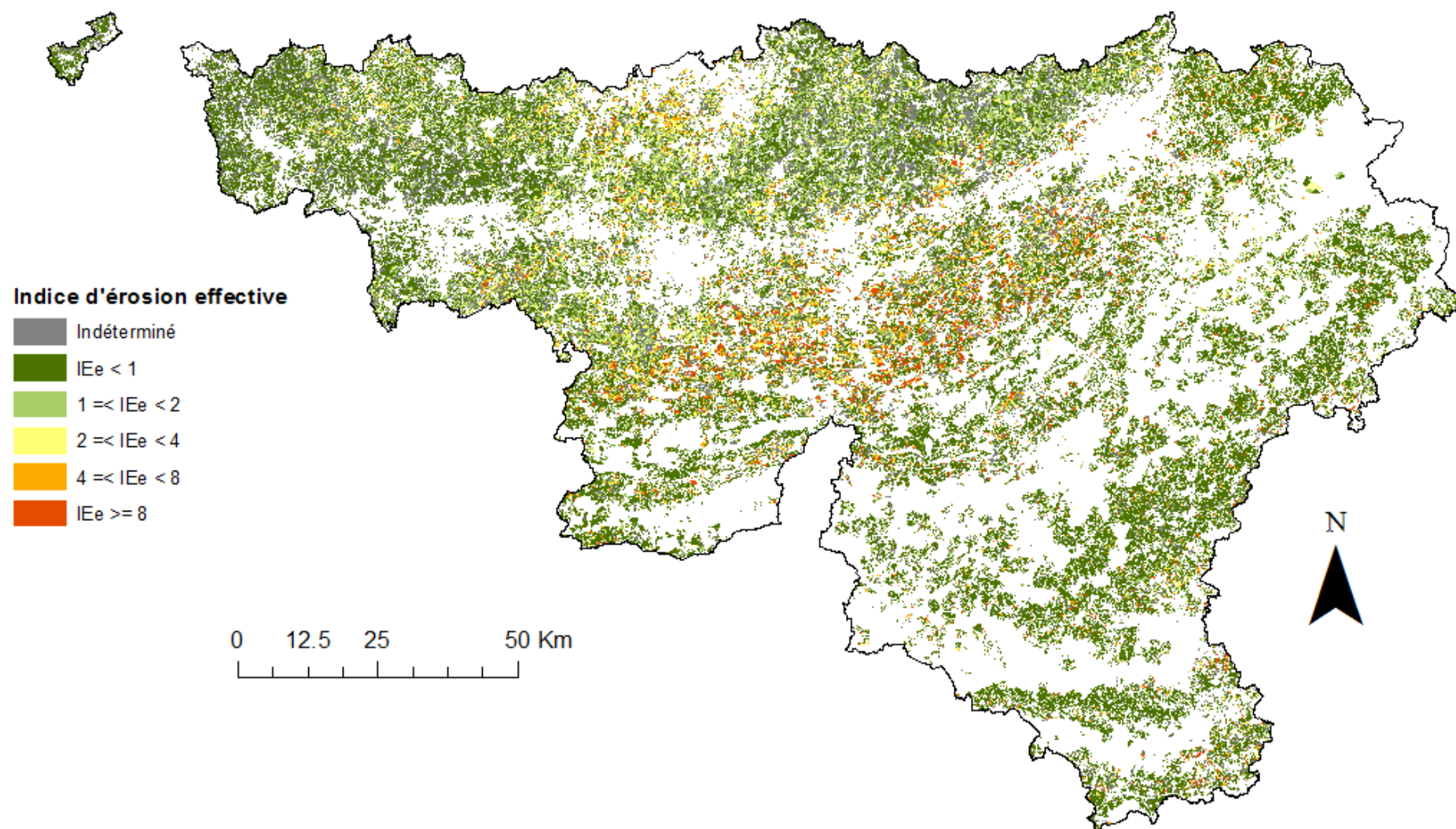


Figure 12 : Indices d'érosion effective (IE_e) des parcelles déclarées en 2009

L'utilisation d'une valeur seuil de 2 pour l'indice d'érosion potentielle permettrait d'obtenir un indice d'érosion effective proche de 1 pour près de 90% des rotations quel que soit la région agricole.

Tableau 10 : Valeurs des facteurs C des rotations pour les percentiles 10 et 90 ainsi que la médiane pour les différentes régions agricoles. Un exemple de rotation triennale est fourni pour chaque valeur de facteur C (B = betterave, Es = escourgeon, F = froment, M = maïs, P = prairie, Pdt = pomme de terre).

Région agricole	Facteur C de la rotation		
	Percentile 10	Médiane	Percentile 90
Ardenne	0,10	0,12	0,55
<i>Exemple de rotation</i>	<i>2P-1Es</i>	<i>2P-1M</i>	<i>3M</i>
Campine Hennuyère	0,12	0,45	0,55
<i>Exemple de rotation</i>	<i>2P-1M</i>	<i>1Pdt-2F</i>	<i>3M</i>
Condroz	0,12	0,40	0,48
<i>Exemple de rotation</i>	<i>2P-1M</i>	<i>1B-2F</i>	<i>1L-2F</i>
Fagne	0,12	0,46	0,55
<i>Exemple de rotation</i>	<i>2P-1M</i>	<i>2F-1M</i>	<i>3M</i>
Famenne	0,15	0,43	0,55
<i>Exemple de rotation</i>	<i>2P-1M</i>	<i>Es-F-M</i>	<i>3M</i>
Haute Ardenne	0,15	0,15	0,55
<i>Exemple de rotation</i>	<i>2P-1M</i>	<i>2P-1M</i>	<i>3M</i>
Région Herbagère	0,15	0,46	0,55
<i>Exemple de rotation</i>	<i>2P-1M</i>	<i>2F-1M</i>	<i>3M</i>
Région Jurassique	0,15	0,43	0,55
<i>Exemple de rotation</i>	<i>2P-1M</i>	<i>Es-F-M</i>	<i>3M</i>
Région Limoneuse	0,37	0,44	0,50
<i>Exemple de rotation</i>	<i>Es-F-B</i>	<i>F-B-Pdt</i>	<i>2M-1F</i>
Région Sablo-Limoneuse	0,37	0,43	0,50
<i>Exemple de rotation</i>	<i>Es-F-B</i>	<i>Es-F-Pdt</i>	<i>2M-1F</i>

La Figure 13 compare la méthode actuelle d'identification des parcelles à risque d'érosion (pente > 10%) avec la méthode basée sur une valeur d'IE_p > 4, en termes de nombre de parcelles en culture et la superficie concernée, par région agricole et pour l'ensemble de la Wallonie. A l'échelle de la Wallonie, le nombre de parcelles en culture concernée par un IE_p > 4 est de 46% (61% de la surface en culture) contre 22% (29% de la surface en culture) pour la méthode actuellement en vigueur. L'impact est différent selon la région agricole. Un IE_p > 4 aboutit à la sélection de l'essentiel des parcelles et de la surface cultivée dans les régions caractérisées par un faible taux de culture, des sols caillouteux et un relief accidenté comme l'Ardenne et la Haute-Ardenne, avec respectivement 85 à 93% du nombre de parcelles cultivées et 93% à 98% de la superficie cultivée. Dans les régions de grandes cultures où les sols sont les plus profonds et où le relief est moins accidenté, la proportion de parcelles sélectionnées est moindre, à savoir 11% à 25% du nombre de parcelles cultivées et 23 à 45% de la superficie cultivées en Régions Limoneuse et Sablo-Limoneuse, respectivement. Pour les autres régions, la proportion de parcelles à risque d'érosion varie entre 52% et 71% et la surface cultivée à risque entre 72% et 83%.

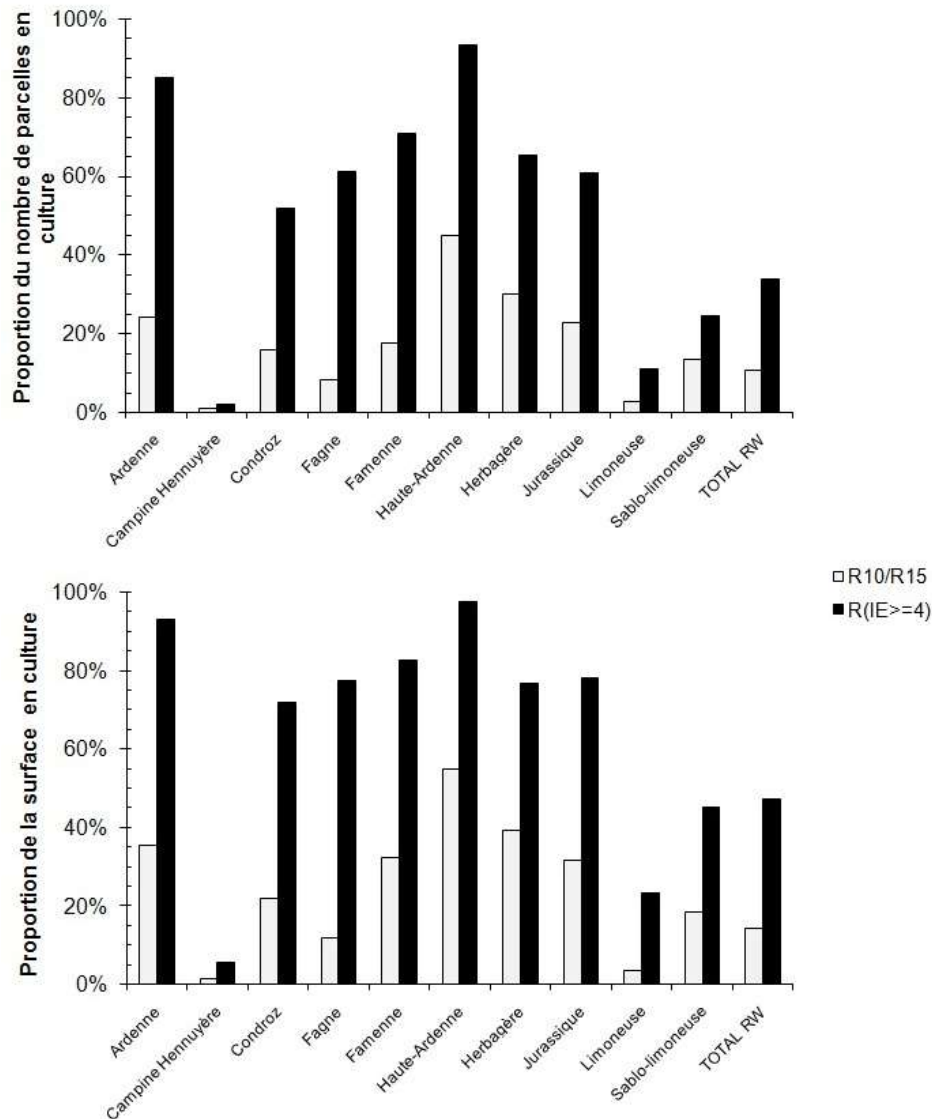


Figure 13 : Impact de la méthode d'identification des parcelles à risque d'érosion (méthode R10 en vigueur actuellement et méthode avec $IE_p > 4$) sur la proportion de parcelles en culture et la surface cultivée identifiées selon les régions agricoles de Wallonie.

La Campine Hennuyère présente de faibles proportions de parcelles et de surface cultivées à risque car il s'agit d'une région avec une très faible surface agricole dont près de la moitié est en prairie permanente. Elle présente de plus un relief peu accidenté. La proportion de parcelles et de surface en culture identifiée par un $IE_p > 4$ est donc bien plus importante que celle définie actuellement. L'utilisation d'une valeur seuil d' IE_p de 2 accroîtrait encore fortement ces proportions puisque 63% des parcelles en culture seraient identifiées, soit 78% de la surface totale des parcelles en culture.

L'identification des parcelles à risque peut encore être améliorée en intégrant au calcul de l'érosion potentielle parcellaire les phénomènes de redéposition au sein de la parcelle. A ce stade, nous ne disposons pas d'une méthodologie permettant le calcul de la sédimentation qui soit applicable à l'ensemble de la Wallonie.

Il sera également nécessaire de pouvoir définir une valeur d'érosion tolérable pour les parcelles reposant sur des sols recensés comme 'non cartographiées' par la carte numérique des sols de Wallonie. Rappelons 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 (par les outils de travail du sol) 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.

2.3 Délivrables

Différents livrables ont été remis au SPW concernant cette section. Il s'agit des rapports intermédiaires de la convention GISER. Il est accessible via la Direction du Développement Rural du Département de la Ruralité et des Cors d'eau de la DGO3. Différentes cartes ont également été fournies au SPW pour une mise en ligne sur le Géoportail de la Wallonie. Il s'agit :

- de l'érosion tolérable au format shapefile ;
- de l'érosion potentielle parcellaire avec une résolution de 10 m produite au format raster sur base du script Python et de son manuel d'utilisation remis lors de la convention précédente (GISER 2009-2011, Bielders et al.). Cette information est également disponible sous forme d'un atlas des communal ;
- de l'érosion potentielle parcellaire 2009 au format shapefile ;
- de l'érosion potentielle parcellaire 2011 au format shapefile ;
- de l'indice d'érosion potentielle parcellaire pour l'année 2009 au format shapefile ;
- de l'indice d'érosion potentielle parcellaire pour l'année 2011 au format shapefile ;
- de l'indice d'érosion effective parcellaire pour l'année 2009 au shapefile.

Pour finir, des fiches résultats connexes sont disponibles sur le site www.giser.be.

3. Méthodologie pour la cartographie des parcelles à risque d'érosion du point de vue de la vulnérabilité des biens et des personnes

Les parcelles à risque d'érosion peuvent être définies sur base de la vulnérabilité des sols à l'érosion (§2), ou sur base des dommages aux biens (habitat, infrastructures routières, zones d'activité économique...) et aux personnes, principalement causés par des inondations boueuses. Ces dernières se produisent sur des axes de concentration du ruissellement alimentés par des surfaces contributives composées au moins en partie de parcelles agricoles (principales sources de sédiments). Ces parcelles contribuent à des degrés divers à la charge solide dans les eaux de ruissellement en fonction des flux d'eau qui les traversent et de leur capacité à être érodées ou à provoquer la sédimentation de la terre détachée en amont.

Pour la cartographie du risque d'érosion sur base de la vulnérabilité des sols, les parcelles ont été considérées comme hydrologiquement isolées afin de déterminer les pertes en sol imputables uniquement à la parcelle et à sa gestion, dans un but de responsabilisation de l'exploitant. Par ailleurs, la redéposition de sédiments au sein des parcelles n'a pas été prise en compte. Dans un contexte de cartographie du risque sur base de la vulnérabilité des infrastructures, et afin d'identifier les parcelles où l'aléa érosif est élevé, il devient cependant nécessaire de tenir compte de la connectivité entre les parcelles et de déterminer la production nette de sédiments par chacune d'elles à partir d'un bilan entre la quantité de terre érodée et la quantité de terre redéposée. Au final, cette approche doit permettre de cibler les mesures prioritaires à mettre en place pour protéger les infrastructures en aval. Ces dernières peuvent relever de l'hydraulique douce (fascines, bandes enherbées...) ou être liées à des changements de pratiques culturales.

3.1. Définition des zones vulnérables

Des cartes de risque d'inondation ont été mises au point afin de répondre à la directive cadre inondation (SPW, DGO3 – DCENN). Ces dernières recensent les récepteurs de risque (zone vulnérables) qui sont définis comme toute personne, objet, terrain ou activité qui pourraient subir un préjudice ou des dommages dans le cas d'une inondation.

Les récepteurs recensés comprennent les catégories suivantes :

- la population touchée (nombre d'habitants)
- les activités économiques de service (services administratifs, équipements scolaires, services social et de santé, police, pompier et protection civile)
- les activités économiques du secteur marchand (commerces, industrie, zones portuaires, aéroports et aérodrômes)

- les activités récréatives (campings)
- les infrastructures agricoles (bâtiments agricoles, serres)
- les installations (cabine électrique, cabines destinées au transport, au conditionnement ou à la distribution de gaz, cabines téléphoniques, électricité, équipements de télécommunication)
- les stations d'épuration
- les activités sources de pollution (décharges et friches industrielles, sites SEVESO et EPRTR : European Pollutant Release and Transfer Register)
- les biens classés
- le réseau de transport (autoroutes, routes principales, rings, bretelles, routes secondaires, routes locales telles que définies par NAVTEQ)
- les zones vulnérables d'un point de vue environnemental (captage d'eau de surface et souterraines, zones vulnérables aux nitrates, sites NATURA 2000 et autres réserves...)
- les bassins d'orages du PASH (existants, en construction ou à réaliser)

3.2. Détermination du risque d'inondation boueuse en zone vulnérable

Il est possible de déterminer le risque potentiel d'inondation boueuse dans les zones vulnérables en utilisant l'information issue de l'aléa inondation par ruissellement complétée par la charge en sédiments. L'aléa inondation par ruissellement peut être extrait des cartes d'aléa inondation qui reprennent également l'aléa d'inondation par débordement de cours d'eau. Il existe des cartes pour des pluies ayant des périodes de retour de 25, 50, 100 ans et pour une situation extrême correspondant à la période de retour de 100 ans majorée de 30%. Un extrait de la version provisoire de la cartographie de l'aléa inondation est fourni à la Figure 14. Il est à noter que ces cartes ont été établies en considérant le sol des parcelles agricoles nu sauf pour les prairies permanentes. La méthodologie utilisée pour établir les cartes de l'aléa inondation est disponible via le lien suivant : http://geoportail.wallonie.be/files/docs/Inondations/AleaEtZi_2013/Note_methodo_carto20131015_Final.pdf

Sur les axes de concentration du ruissellement, les cartes d'aléa inondation permettent de discriminer les pixels (10 m) selon l'importance du débit de pointe (faible, moyen ou élevé) pour la période de retour considérée. A chacun de ces pixels sont également associés une valeur de débit de pointe et un volume d'eau ruisselée total.

La vulnérabilité d'un récepteur dépendra du type de récepteur d'une part, et d'autre part de sa localisation (ou non) sur un axe de ruissellement. La question de la précision de la géolocalisation des récepteurs et des axes de ruissellement est donc posée. Vu l'incertitude qui affecte la localisation des axes de ruissellement, il a été décidé d'étendre l'emprise des axes de ruissellement de 10 mètres de part et d'autres de chaque pixel.

Si un axe de ruissellement traverse une zone vulnérable, il faut définir pour chaque pixel de l'axe la charge en sédiments en vue de déterminer le niveau de risque d'inondation boueuse. Pour cela, il convient dans un premier de déterminer le bassin versant qui alimente l'axe de ruissellement (Figure 15). Il faut ensuite déterminer pour chaque pixel du bassin versant la quantité de terre qui est transmise vers l'aval. Cela signifie qu'il faut déterminer pour chaque pixel le bilan net d'érosion, sur base de la quantité de terre qui provient de l'amont et de la quantité de terre érodée qu'il produit ou qui s'y redépose. La quantité de terre sortant des pixels de l'axe de ruissellement couplée à l'information sur le volume de ruissellement rend compte de l'ampleur d'une potentielle inondation boueuse en fonction de la période de retour choisie.

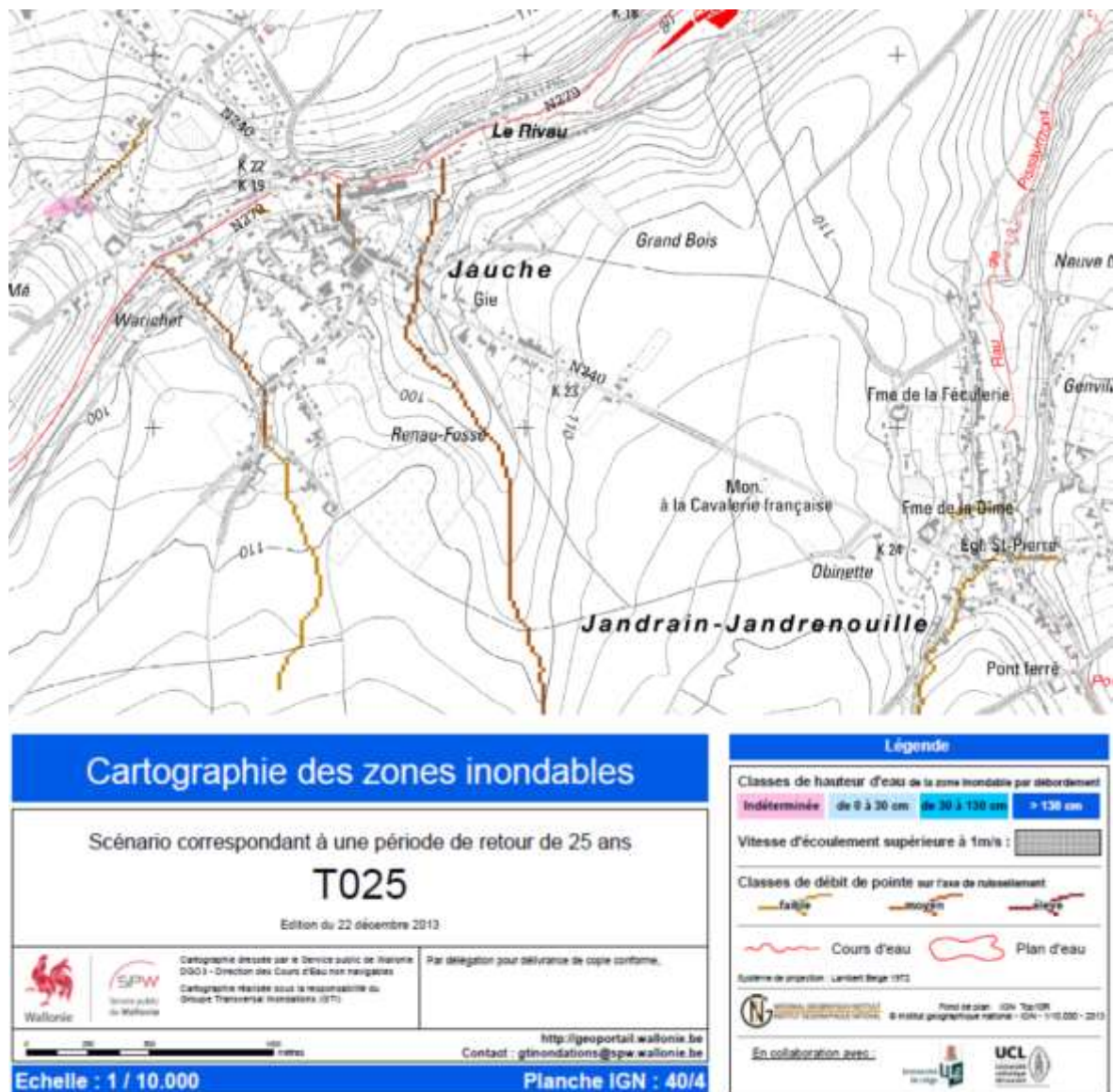


Figure 14 : Extrait de la version provisoire de la cartographie des zones inondables (source : SPW, DGO3-DCENN)

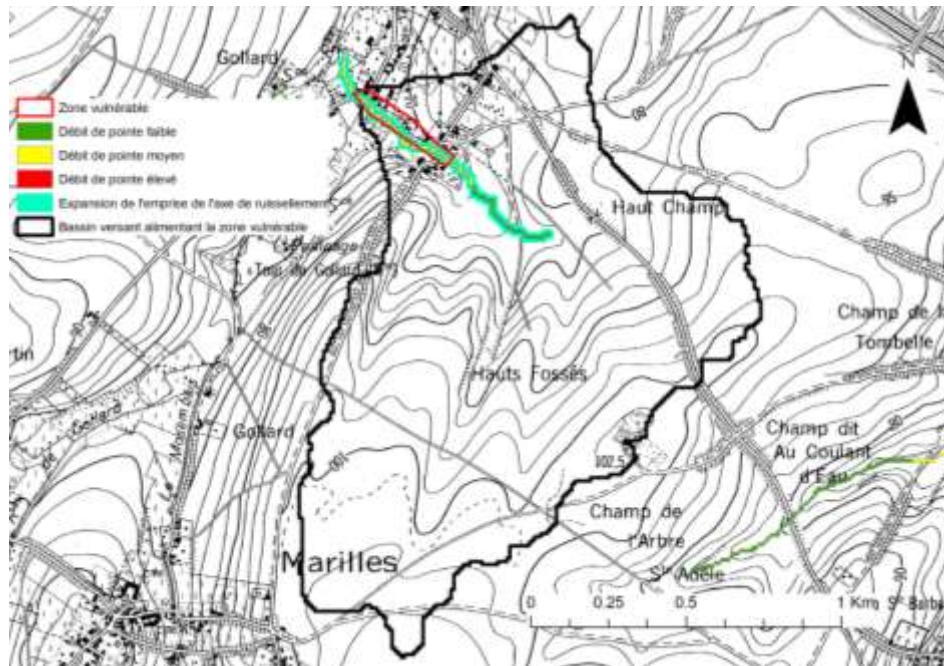


Figure 15 : La zone vulnérable est représentée en rouge. Elle est traversée par un axe de ruissellement dont L'emprise est augmentée de 10 m de part et d'autre.

3.3. Détermination de l'aléa érosion et identification des parcelles problématiques

Les quantités de terre érodée qui interviennent dans le bilan net d'érosion peuvent être estimées sur base de l'équation universelle de pertes en sol (RUSLE, Wischmeier et Smith, 1978) sans tenir compte des facteurs cultureux et d'éventuels aménagements antiérosifs. Il s'agit donc de l'érosion potentielle (E_p , Equation 2) telle que définie et utilisée pour identifier les parcelles à risque d'érosion dans une perspective de conservation des sols.

Les valeurs d'érosion potentielle calculées correspondent à une moyenne annuelle à long terme de quantité de terre érodée et non pas à une quantité de terre érodée pour un événement climatique donné. Pour cela, dans l'Equation 2, il convient de remplacer R par R_e , c'est-à-dire par l'érosivité de l'événement climatique calculée selon l'Equation 7.

$$R_e = I_{30} * h * e$$

Equation 7

R_e : érosivité de l'événement climatique [$\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$]

I_{30} : intensité maximale de la pluie de durée de 30 min pour l'événement [mm h^{-1}]

h : Hauteur de pluie de l'événement [mm]

e : énergie cinétique de la pluie [$\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$]

L'énergie cinétique de la pluie peut être déterminée selon l'Equation 8 (Bollinne et al., 1984; van Dijk et al., 2002)

$$e = e_{\max} * (1 - a * \exp(-b * I)) * I * t$$

Equation 8

où

e_{\max} : énergie cinétique maximum dans la zone d'étude (29 J m⁻² mm⁻¹ pour la Belgique centrale)

$a = 0.6$ et $b = 0.061 \text{ h mm}^{-1}$, constantes qui dépendent de la position géographique

I : intensité de la pluie [mm h⁻¹]

t = durée de la pluie [h]

Pour déterminer la quantité nette de sédiments transitant en un point donné, il est nécessaire de prendre en compte les processus de redéposition au sein du bassin versant. Le processus de redéposition doit être modélisé au moyen d'un modèle compatible avec la structure de la RUSLE. Trois modèles répondent à ce critère, à savoir USPED (Mitasova et al., 1996), le module de déposition de la version 2 de la RUSLE (USDA, 2008) et WATEM/SEDEM (Van Oost et al., 2000 ; Van Rompaey et al., 2001). USPED n'est pas retenu car il ne permet pas de quantifier la déposition mais simplement de différencier les zones d'érosion et de déposition. La version 2 de la RUSLE diffère de la version 1 car elle intègre la déposition mais également parce qu'elle fournit une valeur d'érosion annuelle basée sur un calcul journalier. Cependant, la structure de l'équation permettant d'estimer l'érosion reste la même. Dès lors, pour un événement climatique particulier, il est possible d'utiliser l'Equation 7 où R est remplacé par R_e . Le taux de déposition (D , [kg m⁻² h⁻¹]) est quant à lui calculé selon l'Equation 9. Il est proportionnel à la vitesse de sédimentation des particules de sol (V_f , [m h⁻¹]), à la différence entre le flux de sédiments (F_s , [kg m⁻¹ h⁻¹]) et la capacité de transport (T_c ; [kg m⁻¹ h⁻¹] ; Equation 10) et inversement proportionnel au débit par unité de largeur (q , [m³ m⁻¹ h⁻¹]).

$$D = \frac{V_f}{q} * (F_s - T_c)$$

Equation 9

$$T_c = k_t * q * \theta$$

.....Equation 10

où

k_t : coefficient de transport qui diminue quand la résistance hydraulique, définie à partir de la couverture et de la rugosité du sol, augmente [kg m⁻³]

θ : pente [m m⁻¹]

La version 2 de la RUSLE résout les équations de déposition pour chacune des 5 classes de particules de sol suivantes : argile, limon, petits agrégats, gros agrégats et sable en fonction de l'information issue de la texture du sol.

Le modèle WATEM/SEDEM comporte également une composante « déposition » déjà testée lors de la convention GISER 2009-2011 (Biielders et al., 2011) dans la cadre de la mise au point d'une méthodologie pour déterminer l'efficacité des bandes enherbées. Ce modèle induit de la déposition en un endroit donné lorsque la charge en sédiments excède la capacité de transport. Dans une telle situation, la quantité de terre déposée (D , [kg m⁻² h⁻¹] ; Equation 11) est égale à la différence entre le flux de GISER – Détermination des parcelles à risque d'érosion – Méthodologie pour la cartographie des parcelles à risque d'érosion du point de vue de la vulnérabilité des biens et des personnes

sédiments (S_f , [kg m⁻² h⁻¹]) et la capacité de transport (C_t , [kg m⁻² h⁻¹]). Cette dernière est définie par l'Equation 12 (Van Rompaey et al., 2001).

$$D = S_f - C_t \quad \text{si } S_f > C_t$$

Equation 11

$$C_t = k_{tc} * R_e * K * (LS - 4.12 * \theta^{0.8})$$

Equation 12

où k_{tc} est le coefficient de capacité de transport [m] qui dépend du type d'occupation du sol. Il a été calibré par Van Rompaey et al. (2001) pour le bassin de la Dyle. Les valeurs optimales sont de 75 m pour les terres arables et 42 m pour les surfaces de type prairie ou forêt.

Le module de déposition du modèle WATEM/SEDEM (Water and Tillage Erosion Model - SEdiment DELivery Model) présente l'avantage de la simplicité pour sa mise en œuvre car elle nécessite les mêmes données d'entrée que celles utilisées pour déterminer l'érosion via la RUSLE. La version 2 de la RUSLE est plus complexe car elle nécessite d'estimer les volumes de ruissellement pour chaque pixel ainsi que la granulométrie des sédiments. Cette dernière information n'est pas disponible à l'échelle de la Wallonie. Pour des raisons pratiques de mise en œuvre, il est donc proposé d'utiliser le module de déposition du modèle WATEM/SEDEM.

Le bilan net d'érosion, calculé pour chaque pixel, peut être croisé avec le parcellaire agricole pour identifier les parcelles problématiques (Figure 16). Cependant, l'identification des parcelles problématiques est plus complexe qu'un simple calcul de bilan net d'érosion à l'échelle parcellaire. En effet, une parcelle plus en amont dans un bassin versant qui présente de la sédimentation dans sa partie en amont et de l'érosion en aval (Parcelle 1 ; Figure 17) pourrait avoir le même bilan net d'érosion qu'une parcelle en aval qui érode dans sa partie amont et redépose en aval (Parcelle 2 ; Figure 17) mais pas la même contribution au risque d'inondation boueuse. En effet, la Figure 17 montre que les deux parcelles ont un bilan net d'érosion de 2 tonnes mais que sur les 8 tonnes qui arrivent à l'exutoire, 6 tonnes peuvent être imputées à la parcelle 1.

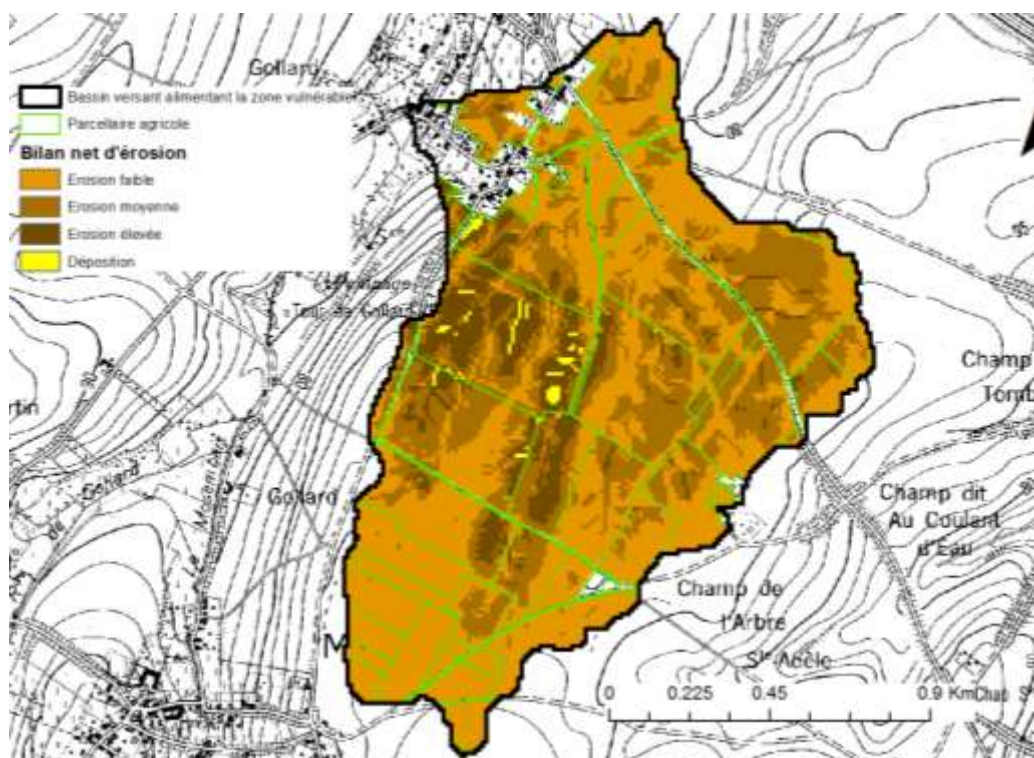


Figure 16 : Alea érosif défini sur base du bilan net d'érosion pour chaque pixel du bassin versant. Cette information est croisée avec le parcellaire agricole pour identifier les parcelles problématiques.

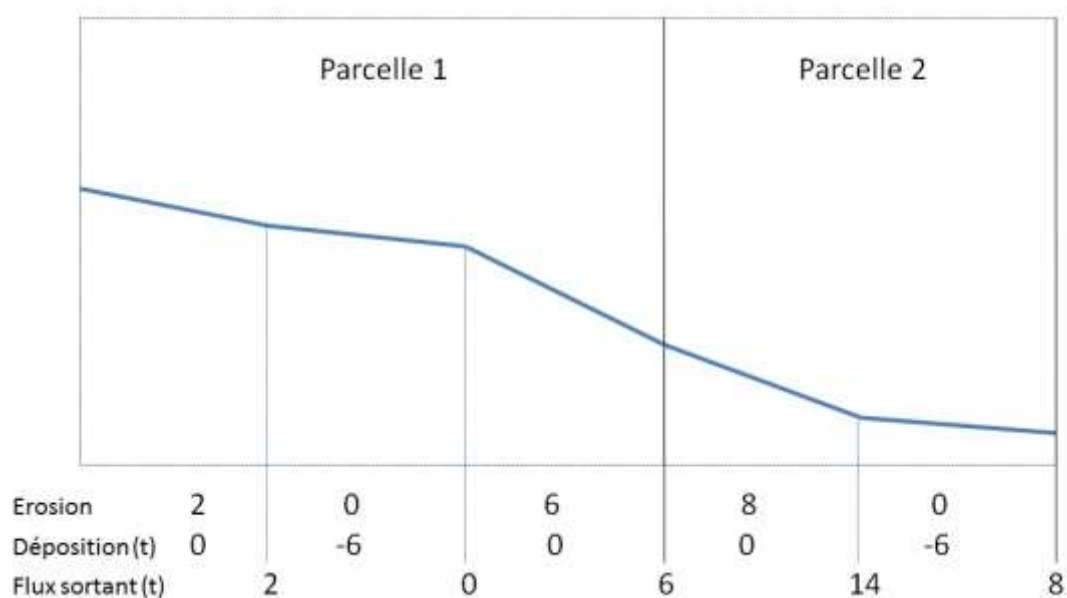


Figure 17 : Impact de la distribution des zones d'érosion et de déposition au sein des parcelles sur leur contribution à l'aléa érosif à l'échelle du bassin versant.

Conclusions

4.1. Cartographie de l'érosion effective parcellaire

L'érosion effective du parcellaire agricole de la Wallonie peut être déterminée en intégrant au calcul de l'érosion potentielle le facteur C des successions culturales. Cette érosion effective ne prend pas en compte les phénomènes de sédimentation au sein de la parcelle, ni les mesures anti-érosives éventuelles et considère les parcelles comme hydrologiquement isolées. Sur base du travail effectué dans la convention GISER 2009-2011 (Biëlders et al., 2011) et à partir de regroupements, il est possible de déterminer l'érosion effective pour plus de 80 % des parcelles de la Wallonie. Les données manquantes concernent essentiellement, les céréales de printemps et les cultures maraîchères. Le calcul de l'érosion effective pour les successions culturales observées de 2007 à 2009 montre que la partie Nord de la Région malgré un potentiel érosif plus faible que la partie Sud est plus exposée aux pertes en sol en raison de rotations favorables à l'érosion du sol. Au contraire, la partie Sud de la Wallonie malgré un relief et un climat plus favorable à l'érosion, présente des taux d'érosion faibles dus à une occupation du sol avec une grande proportion de prairies. Dans cette partie de la Wallonie, la mise en culture entraîne cependant en général des taux d'érosion importants. Ce chapitre met en évidence le rôle prépondérant de l'occupation du sol, du choix des rotations et des cultures dans la gestion du risque érosif.

4.2. Cartographie des parcelles à risque d'érosion du point de vue de la vulnérabilité des sols

La cartographie du risque d'érosion hydrique diffuse et en rigole résulte de la conjonction d'un aléa érosif et de la vulnérabilité. Le modèle empirique RUSLE est à la base du calcul de l'aléa érosif à savoir l'érosion potentielle parcellaire. Combinés aux valeurs des seuils d'érosion tolérable tenant compte de la vulnérabilité des sols, les valeurs d'érosion potentielle 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 pourraient être imposés dans le cadre de la conditionnalité. Pour cela, il convient de définir une valeur seuil d'indice d'érosion potentielle. Une valeur seuil de 2 permettrait de maintenir l'érosion réelle à un niveau proche du seuil d'érosion tolérable pour 90% des rotations observées en Wallonie. Cependant, cela impliquerait de classer à risque la majorité du territoire wallon. Même si cela semble moins justifiable du point de vue de la conservation des sols, une valeur seuil de 4 semble plus réaliste bien qu'elle implique également une très forte augmentation du nombre et de la superficie de parcelles cultivées classées à risque par rapport à la méthodologie existante. La méthodologie présentée peut 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 pour l'instant pas 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.

4.3. Méthodologie pour la cartographie des parcelles à risque d'érosion du point de vue de la vulnérabilité des biens et des personnes

La méthodologie proposée doit être appliquée sur une zone test afin d'en vérifier la faisabilité et le réalisme. Il faudra dans un premier temps définir pour les inondations boueuses les seuils de concentration en sédiments (ou les masses de sédiments) permettant de définir le risque associé aux zones vulnérables. Il conviendra ensuite de déterminer les zones d'érosion et de déposition au niveau du bassin versant. Il faudra ensuite déterminer comment leur répartition spatiale à l'échelle parcellaire ainsi que les positions relatives des parcelles au sein du bassin versant peuvent permettre d'identifier les parcelles problématiques. On évaluera la possibilité de calibrer et de valider les seuils de concentration en sédiments et de bilan net d'érosion en utilisant les zones de dégâts et de production de sédiments recensées par la cellule expertise de GISER.

Bibliographie

- Biielders, C., Degré, A., Colard, F., Cordonnier, H., Destain, M.-F., Feltz, N., Maignard, A., 2011. *Convention d'intérêt général - Gestion Intégrée Sol Erosion Ruissellement (GISER)*. Université catholique de Louvain – Gembloux Agro-BioTech – Direction Générale de l'Agriculture.
- Bollinne, A., Florins, P., Hecq, P., Homerin, D., Renard, V., Wolfs, J., 1984. *Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique*. Thèse, Université de Liège, Liège.
- Cordonnier, H., Biielders, C., 2007. *Appui à la mise en œuvre des mesures agri-environnementales dans le cadre de la lutte contre le ruissellement et l'érosion des terres agricoles en Wallonie*. Convention ALURE. Université catholique de Louvain – Direction Général de l'Agriculture.
- Gabriels, D., Ghekiere, G., Schiettecatte, W., Rottiers, I., 2003. *Assesment of USLE cover-management C-factors for 40 crop rotation systems on arable farms in the Kemmelbeek watershed, Belgium*, Soil & Tillage Research, 74, 47-53
- Hall, G.F, Daniels, R.B., 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., 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.
- Kort, J., Collins, M., Ditsch, D., 1998. *A review of soil erosion potential associated with biomass crops*. Biomass and Bioenergy, 14, 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.
- Li, L., Du, S., Wu, L., Liu ,G. 2009. *An overview of soil loss tolerance*. Catena 78, 93-99.
- Liégeois, M., Wicherek, S., Amat, J-P., 2004. *Réflexions sur la vulnérabilité à l'aléa érosion*. Cahiers Agricultures 13, 355-61.
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R., 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10, (8), 629– 641.
- Morgan, R.P.C., 2005. *Soil Erosion and Conservation*. 3rd Edn. Longman Group, John Wiley & Sons Inc, New York, NY.
- 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.

Schumm ,S.A., 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.

U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 2008. *Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2)*. Science Documentation, Washington D.C

Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazaba, I. C., 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.

van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A., Rosewell, C.J., 2002. *Rainfall intensity-kinetic energy relationships : a critical literature appraisal*. Journal of Hydrology, 261 (1-4), 1-23.

Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P., 2000. *Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage*. Landscape Ecology 15, 577-589.

Van Rompaey, A.J.J., Vestraeten, G., Van Oost, K.G., Govers, G. et al., 2001. *Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach*. Earth Surface Processes and Landforms, 26, 1221– 1236.

Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R.J., 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., 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., Demarée, G., Salles, C., 2006. *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., Smith, D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning*, Agriculture Handbook 537, Washington D. C.

Yoder, D. C., Porter, J. P., Laflen, J. M., Simanton, J. R., Renard, K. G., McCool, D. K., Foster, G. R., 1997. Cover-Management Factor (C), in Renard K. G. et al. (ed), *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Agricultural Handbook (703), pp 143-181.

Contact :

Cellule GISER
c/o SPW-DGO3-DDR
Av. Prince de Liège 7
5100 Jambes
081 336 471
arnaud.dewez@giser.be

Annexes

Annexe 1 : Valeurs moyennes annuelles du facteur C toutes régions confondues et pour la Région Limoneuse ainsi que les valeurs de la littérature (Gabriels et al., 2003 et Verstraeten et al., 2001) pour les monocultures (GISER 2009-2011).

	Monoculture	Toutes régions agricoles		Région Limoneuse		Gabriels et al., 2003	Verstraeten et al., 2001
		Labour d'automne	Labour de printemps	Labour d'automne	Labour de printemps		
Facteur C	Maïs	0.55	0.57	0.53	0.55	X	0.45
	Froment	0.42		0.40		X	0.34
	Escourgeon	0.35		0.31		X	X

Annexe 2 : Valeurs moyennes annuelles du facteur C toutes régions confondues et pour la Région Limoneuse ainsi que les valeurs de la littérature (Gabriels et al., 2003 et Verstraeten et al., 2001) pour les rotations à 2 cultures (GISER 2009-2011).

Succession de deux cultures			Toutes régions agricoles		Région Limoneuse		Gabriels et al., 2003	Verstraeten et al., 2001
			Labour d'automne	Labour de printemps	Labour d'automne	Labour de printemps		
Facteur C	Froment-Betterave	2 F et 1 B	0.40	0.39	0.37	0.36	X	X
		2 B et 1 F	0.38	0.38	0.35	0.35		
	Froment-Maïs	2 F et 1 M	0.46	0.45	0.43	0.43	0.32	0.41
		2 M et 1 F	0.50	0.50	0.48	0.48		
	Froment- PdT	2 F et 1 PdT	0.45	0.44	0.44	0.42	X	X
		2 PdT et 1 F	0.49	0.50	0.48	0.49		
	Froment-Lin	2 F et 1 L	0.48	0.47	0.46	0.45	X	X
		2 L et 1 F	0.55	0.55	0.54	0.55		
	Froment-Colza	2 F et 1 C	0.40		X	X	X	X
		2 C et 1 F	0.38					
	Froment-Escourgeon	2 F et 1 E	0.40		0.37		X	X
		2 E et 1 F	0.37		0.34			
	Escourgeon- PdT	2 E et 1 PdT	0.40	0.39	0.38	0.37	X	X
		2 PdT et 1 E	0.46	0.47	0.45	0.46		
	Escourgeon-Lin	2 E et 1 L	0.42	0.41	0.40	0.39	X	X
		2 L et 1 E	0.51	0.52	0.50	0.51		
	Escourgeon-Colza	2 E et 1 C	0.35		X	X	X	X
		2 C et 1 E	0.36					
	Epeautre- Betterave	2 Ep et 1 B	0.41	0.41	X	X	X	X
		2 B et 1 Ep	0.39	0.39				
	Epeautre-Maïs	2 Ep et 1 M	0.48	0.47	X	X	X	X
		2 M et 1 Ep	0.51	0.51				
	Epeautre- PdT	2 Ep et 1 PdT	0.47	0.46	X	X	X	X
		2 PdT et 1 Ep	0.50	0.51				

Annexe 3 : Valeurs moyennes annuelles du facteur C toutes régions confondues et pour la Région Limoneuse ainsi que les valeurs de la littérature (Gabriels et al., 2003 et Verstraeten et al., 2001) pour les rotations à 3 cultures (GISER 2009-2011).

Succession de trois cultures			Toutes régions agricoles		Région Limoneuse		Gabriels et al., 2003	Verstraeten et al., 2001
			Labour d'automne	Labour de printemps	Labour d'automne	Labour de printemps		
Facteur C	Betterave-Froment-PdT	B-F-PdT	0.44	0.44	0.41	0.42	0.28	0.31
		PdT-F-B	0.44	0.44	0.42	0.42		
	Betterave-Froment-Maïs	B-F-M	0.44	0.44	0.41	0.41	0.29	X
		M-F-B	0.44	0.45	0.41	0.41		
	Betterave-Froment-Lin	B-F-L	0.46	0.47	0.44	0.45	X	X
		L-F-B	0.46	0.46	0.44	0.44		
	Maïs-Froment-PdT	M-F-PdT	0.50	0.51	0.48	0.49	0.39	0.38
		PdT-F-M	0.50	0.49	0.48	0.48		
	PdT-Escourgeon-Betterave	X	0.41	0.41	0.39	0.39	0.28	X
	Lin-Escourgeon-Betterave	X	0.43	0.43	0.41	0.41	X	X
	PdT-Escourgeon-Maïs	X	0.47	0.47	0.45	0.45	0.39	X
	Escourgeon-PdT-Froment	E-PdT-F	0.43	0.42	0.41	0.40	X	X
		F-PdT-E	0.43	0.42	0.41	0.40		
	Escourgeon-Lin-Froment	E-L-F	0.45	0.44	0.43	0.42	X	X
		F-L-E	0.45	0.44	0.43	0.42		
	Escourgeon-Colza-Froment	Toutes combinaisons	0.38		X	X	X	X
	Froment-Escourgeon-Betterave	X	0.37	0.37	0.34	0.33	X	0.26
	Froment-Escourgeon-Maïs	X	0.43	0.43	0.41	0.40	0.32	0.41