



Gembloux Agro-Bio Tech
Université de Liège

GISER

Caractérisation et prédiction du ravinement en Wallonie

Le ravinement est une forme d'érosion concentrée causant de fortes pertes en terre sur les terres agricoles mais pouvant aussi causer des coulées boueuses qui entraîne des dégâts aux infrastructures (routes, zones d'habitat...) en aval. Jusqu'à présent ce phénomène n'a été que peu étudié en Wallonie. Ce rapport a donc pour objet la caractérisation des différentes formes du ravinement et de son étendue en Wallonie. La variabilité spatiale du phénomène et sa récurrence temporelle sont également évalués. Les contextes topographiques et les facteurs qui favorisent l'initiation des ravines et leur arrêt sont également mis en évidence. Pour finir, une étude comparée de la performance de différents indicateurs topographiques et hydrauliques pour prédire le ravinement est menée.

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

Rapport « standalone » mars 2015.

Résumé non technique disponible sur www.giser.be

Table des matières

Liste des abréviations	1
Contexte et objectifs	3
Sites d'études et bases de données de ravines	5
1. Objectifs poursuivis.....	5
1.1. Caractéristiques et variabilité spatiale du ravinement	5
1.2. Variabilité du ravinement dans le temps.....	9
1.3. Evaluation de l'incertitude lié à la caractérisation du ravinement lors de l'utilisation de photographies aériennes et prédiction du ravinement.....	9
2. Création des bases de données de ravines.....	10
2.1. Identification et digitalisation des ravines	10
2.2. Classification des ravines	10
Caractéristiques et variabilité spatio-temporelle des ravines en Wallonie.	12
1. Caractéristiques des ravines dans les sites d'étude.....	12
2. Evaluation de la récurrence du ravinement	15
3. Conclusions	16
Analyse du seuil topographique pour l'initiation des ravines	17
1. Comparaisons des méthodes de seuillage	20
2. Différences régionales.....	23
3. Comparaison avec des seuils topographiques provenant d'autres sites d'étude	26
4. Stabilité du seuil topographique dans le temps.....	28
5. Conclusions	30
Evaluation de l'incertitude sur les caractéristiques des ravines et le seuil topographique liée à l'utilisation de photographies aériennes	31
1. Matériel et méthodes.....	32
1.1. Identification et digitalisation des ravines	32
1.2. Caractéristiques des ravines éphémères et seuils topographiques	33
2. Résultats	34
2.1. Caractéristiques et classification des ravines.....	34

2.2.	Localisation des points d'incision des ravines	37
2.3.	Analyse du seuil topographique	38
3.	Discussion	42
3.1.	Caractéristiques et classification des ravines.....	42
3.2.	Localisation des points d'incision des ravines	45
3.3.	Analyse du seuil topographique	45
4.	Conclusions	48

Caractérisation des facteurs contrôlant l'arrêt des ravines 49

1.	Matériel et méthodes	50
1.1.	Bases de données et sites d'étude	50
1.2.	Caractérisation des principaux facteurs contrôlant l'arrêt des ravines.....	51
1.3.	Seuils de pente critique et seuil topographiques critiques.....	51
1.4.	Approche probabiliste pour prédire le point d'arrêt des ravines contrôlé par la topographie	51
2.	Résultats.....	52
2.1.	Variabilité régionale des principaux facteurs contrôlant l'arrêt des ravines.....	52
2.2.	Points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie	54
2.3.	Points d'arrêt des ravines contrôlés par la végétation	59
2.4.	Points d'arrêt des ravines contrôlés par des éléments linéaires et des fourrières	62
3.	Discussion.....	63
3.1.	Points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie	63
3.2.	Points d'arrêt des ravines contrôlés par la végétation	65
3.3.	Points d'arrêt des ravines contrôlés par des éléments linéaires et des fourrières	65
3.4.	Variabilité régionale des principaux facteurs contrôlant l'arrêt des ravines.....	66
4.	Conclusions	66

Évaluation de la performance d'indicateurs hydrauliques et topographiques pour la prédiction du ravinement temporaire 68

1.	Matériel et méthodes	69
1.2.	Site d'étude et base de données ravines.	69
1.2.	Données utilisées.....	70
1.3.	Calcul des indices topographiques et hydrauliques	70
1.4.	Indicateurs topographiques	71
1.5.	Volume de ruissellement	72

1.6.	Débit de pointe.....	74
1.7.	Vitesse d'écoulement	75
1.8.	Puissance (unitaire) du flux	76
1.9.	Contrainte de cisaillement	77
1.10.	Evaluation de la capacité des indicateurs topographiques et hydrauliques à prédire le ravinement temporaire.....	77
1.11.	Calibration et validation du meilleur indicateur de ravinement	79
2.	Résultats	80
2.1.	Calibration du paramètre λ de la méthode NRCS du Curve Number	80
2.2.	Evaluation de la capacité des indicateurs topographiques et hydrauliques à prédire le ravinement temporaire.....	82
2.3.	Calibration et validation du meilleur indicateur de ravinement	84
2.3.1.	Calibration.....	84
2.3.2.	Validation	87
3.	Discussion.....	89
3.1.	Evaluation de la capacité des indicateurs topographiques et hydrauliques à prédire le ravinement temporaire.....	89
3.2.	Calibration et validation du meilleur indicateur de prédiction du ravinement	90
4.	Conclusions	91

Bibliographie	93
----------------------	-----------

Annexes	99
----------------	-----------

Annexe 1 : Arbre de décision fourni aux 11 opérateurs pour l'identification et la digitalisation des ravines	99
Annexe 2 : Clé de classification fourni aux 11 opérateurs	105
Annexe 3 : Pourcentage de couverture du sol par la végétation (C_c , Equations 8 et 19) selon le type de culture par décade	107
Annexe 4 : Stade d'encroûtement du sol (C_r , Equations 5 et 18) selon le type de culture par décade. F0 : structure fragmentaire initiale, F11 : structure fragmentaire altérée avec des croutes structurales, F12 : encroûtement local, F2 : encroûtement généralisé de la surface.	108
Annexe 5 : Valeur de CN modifiée selon la culture et par décade selon l'Equation 8 pour un sol de groupe hydrologique A	109
Annexe 6: Valeur de CN modifiée selon la culture et par décade selon l'Equation 8 pour un sol de groupe hydrologique B	110
Annexe 7: Valeur de CN modifiée selon la culture et par décade selon l'Equation 8 pour un sol de groupe hydrologique C	111

Annexe 8 : Valeur de CN modifiée selon la culture et par décade selon l'Equation 8 pour un sol de groupe hydrologique D	112
Annexe 9 : Développement de l'Equation 16	113
Annexe 10 : Indicateurs topographiques et hydrauliques rééchelonnés de 0 à 1 dans la zone n ° 3 (Figure 34).	115
Annexe 11: Indicateurs topographiques et hydrauliques rééchelonnés de 0 à 1 dans la zone n ° 8 (Figure 34).	116

Liste des abréviations

a	Coefficient de l'équation du seuil topographique [-]
A	Aire contributive [ha]
A _m	Section circulaire mouillée [m ²]
A _s	Aire contributive unitaire [m ² m ⁻¹]
AUC	Area Under Curve (Aire sous la courbe)
b	Exposant de l'équation du seuil topographique [-]
c	Nombre de vrais positifs
c ₁	coefficient [-]
c ₂	coefficient [-]
C _c	Pourcentage de couverture par la végétation [%]
C _r	Stade d'encroûtement [-]
CN	Curve Number [-]
CN _{bare}	Curve Number pour un sol nu [-]
CN _{max}	Curve Number maximum [-]
CN _{min}	Curve Number minimum [-]
CN _w	Curve Number pondéré [-]
d	Nombre de faux positifs
d ₅₀	Diamètre médian des sédiments [m]
e	Nombre of faux négatifs negatives
f	Nombre de vrais négatifs
g	Gravitational acceleration [m s ⁻²]
H	Hauteru d'eau [mm]
H _r	Hauteur de la lame d'eau ruisselée [mm]
I	Indice topographique [m ³]
I _a	Abstraction initiale [mm]
k	Constante [-]
l	Longueur d'écoulement [m]
n	Coefficient de Gauckler-Manning [-]
n _a	Part du coefficient de Gauckler-Manning liée à la végétation et aux irrégularités de la surface obstructions [-]

n_b	Part du coefficient de Gauckler-Manning liée à la taille des sédiments [-]
n_s	Part du coefficient de Gauckler-Manning liée à la rugosité du sol [-]
n_v	Part du coefficient de Gauckler-Manning liée à la végétation [-]
p	constante [-]
P	Périmètre mouillé [m]
PI	Hauteur précipitée [mm]
PPNC	Plans Photographiques Numériques Communaux
Q	Débit [$m^3 s^{-1}$]
Q_p	Débit de pointe [$m^3 s^{-1}$]
r	Radius [m]
ROC	Receiving Operating Characteristics
S	gradient de pente [$m m^{-1}$]
S_{CN}	Rétention potentielle maximum [mm]
t_c	temps de concentraton [s]
U	Puissance de flux unitaire [$m s^{-1}$]
V	Vitesse du flux [$m s^{-1}$]
V_r	Volume de ruissellement [m^3]
Y	Pente [%]
λ	I_a/S_{CN}
γ	Poids spécifique de l'eau [$N m^{-3}$]
Ω	Puissance du flux [$W m^{-2}$]
Θ	Angle [rad]
τ	Contrainte de cisaillement [$N m^{-2}$]
τ_c	Contrainte de cisaillement critique [$N m^{-2}$]
τ_s	Contrainte de cisaillement exercée par l'écoulement [$N m^{-2}$]

Contexte et Objectifs.

L'érosion par ravinement est une forme concentrée d'érosion hydrique qui requiert une attention particulière car elle induit des pertes en sol importantes. Elle cause des dommages importants aux cultures à la fois là où elle se produit mais également en aval, là où la terre se dépose. Il s'agit d'un phénomène répandu en Belgique. Septante-et-un pourcent des agriculteurs touchés par des problèmes d'érosion en Région Limoneuse, déclarent avoir subi des problèmes de ravinement (Biolders et al., 2003). Pour de petits bassins versants agricoles (< 300 ha) en Région Limoneuse, jusqu'à 80% des pertes en sol par érosion peuvent être attribués au ravinement.

Cette forme d'érosion concentrée est particulièrement problématique car elle augmente la connectivité hydrologique des bassins versants et favorise le transport de sédiments produits au sein du bassin versant. Ceci entraîne une augmentation du risque de coulées boueuses et d'envasement des cours d'eau et des ouvrages de rétention destinées à lutter contre les inondations. Parallèlement, cela peut également induire une pollution des eaux de surface par les sédiments et les contaminants associés. Plus de la moitié des communes wallonnes ont été exposées à une inondation par ruissellement en provenance de bassins versants agricoles entre 1990 et 2000 (Biolders et al., 2003), souvent en raison de problème de ravinement. Ceci peut entraîner des dommages conséquents aux infrastructures et zone d'habitat. D'après Verstraeten et al. (2006), le coût annuel des dommages aux zones d'habitat liés à des coulées boueuses est de l'ordre de 5.5 à 16.5 millions d'euros en Flandres.

Alors que l'érosion par ravinement a fait l'objet de très nombreuses études en Flandre, aucune étude systématique n'a été réalisée sur le sujet en Wallonie à ce jour malgré les impacts environnementaux et économiques potentiellement lourds. Les résultats obtenus en Flandre ne sont par ailleurs pas directement transposables à l'ensemble de la Wallonie vu la plus grande diversité de contextes topographiques et agro-pédologiques favorables au ravinement en Wallonie.

Le but ultime de ce travail est de mettre au point une méthodologie permettant d'identifier les parcelles à risque de ravinement en Wallonie. Une première étape consiste à caractériser l'étendue du problème pour les principales régions agro-pédologiques wallonnes. Ensuite, il est intéressant de caractériser les contextes environnementaux qui facilitent la formation de ravines, ainsi que les contextes qui contraignent l'extension des ravines. Un moyen répandu dans la littérature scientifique pour caractériser les contextes topographiques menant à la formation ou à l'arrêt de ravines est le « seuil topographique » (p.ex., Montgomery and Dietrich, 1992; Vandaele et al., 1996; Vandekerckhove et al., 1998; Wu and Cheng, 2005, Gomez-Gutierrez et al., 2009). Ce seuil est défini sur base de la pente et de l'aire contributive à l'endroit où s'initie la ravine. Il a été montré que le seuil topographique varie entre différents sites d'études et selon le type de ravinement (p.ex., Vandaele et al., 1996), mais à ce jour il n'existe pas d'informations permettant de décrire les conditions topographiques à l'origine de l'initiation des ravines en Wallonie. Par ailleurs, d'autres facteurs liés à l'occupation du sol ou à l'aménagement de l'espace rural peuvent également promouvoir ou contraindre le développement des ravines. Une bonne connaissance de ces facteurs et de leur variabilité

régionale doit permettre de produire des recommandations ciblées pour une meilleure maîtrise du ravinement en terres agricoles.

Outre la caractérisation des contextes entraînant la formation ou l'arrêt des ravines, des outils capables de prédire le risque d'occurrence des ravines et leur trajectoire ont été proposés dans différents contextes environnementaux. Un tel outil opérationnel à l'échelle de la Wallonie est nécessaire pour maximiser le retour sur investissement par les gestionnaires du territoire dans la prévention et la remédiation de l'érosion par ravinement.

La caractérisation du ravinement à l'échelle régionale nécessite une importante base de données de ravines. Il est évident que les approches de terrain devraient servir de référence dans l'acquisition d'information relative aux ravines. Néanmoins leur faible densité spatiale (p.ex., 0.21 à 1.33 km de ravines par km² en Flandre ; Nachtergaele et Poesen, 1999) nécessiterait de travailler sur de grandes aires d'études pour obtenir une estimation fiable des caractéristiques des ravines et des contextes favorables à leur initiation ou leur arrêt. De plus, les ravines rencontrées en Belgique dans les terres cultivées sont généralement des ravines temporaires car elles sont effacées par un travail du sol pour l'implantation d'une nouvelle culture. Il s'agit donc d'un phénomène limité dans le temps qui nécessiterait une veille permanente. Enfin, une approche terrain est problématique dans le cas d'études rétrospectives. Pour ces raisons, des techniques de télédétection sont souvent utilisées pour extraire de l'information sur le ravinement à partir d'imageries aériennes. L'interprétation de photographies aériennes reste la méthode la plus largement répandue pour l'évaluation du ravinement (p.ex., Nachtergaele and Poesen, 1999; Daba et al., 2003; Martinez-Casasnovas, 2003; Parkner et al., 2006; Kakembo et al., 2009). Ceci peut entraîner des erreurs non négligeables ou des biais liés à la subjectivité de l'opérateur (Lunetta et al., 1991). En effet, il a été bien documenté que qu'elle que soit l'application, des décisions humaines lors d'analyse d'images induisent de la subjectivité (p.ex., Legros et al., 1996; Philipson, 1997 in Thierry and Lowell, 2001; Pasquallini et al., 2001; Leckie et al., 2003; Powell et al., 2004; Baveye et al., 2010; Zhou et al., 2010). Tout travail manuel de photo-interprétation devrait donc comprendre une évaluation de l'impact potentiel de la subjectivité sur la qualité des données.

Afin de caractériser au mieux et de prédire l'occurrence du ravinement en Wallonie, nous avons cherché à répondre à 5 questions spécifiques:

- 1) Quel est l'étendue et quelles sont les caractéristiques des ravines en Wallonie ? Quelle est la variabilité spatiale et temporelle de l'érosion par ravinement ?
- 2) Quelle est la variabilité du seuil topographique pour l'initiation des ravines entre régions agricoles de Wallonie et à travers le temps ?
- 3) Quelle est l'incertitude sur l'évaluation des caractéristiques des ravines et le seuil topographique pour l'initiation des ravines lorsque l'on utilise des photographies aériennes ?
- 4) Quels sont les principaux facteurs contrôlant l'arrêt du ravinement ?
- 5) Comment prédire la localisation des ravines sur base des informations disponibles à l'échelle de la Wallonie ?

Sites d'études et bases de données de ravines

Cinq zones d'études ont été définies en fonction des objectifs définis ci-dessus. Dans chacune de ces zones des photographies aériennes en couleur et orthorectifiées, fournies par le Service Public de Wallonie ont été utilisées pour extraire les ravines. Trois jeux d'orthophotoplans étaient disponibles au début de l'étude : le PPNC (Plan Photographique Numérique Communal ; 40 cm de résolution), 2006–2007 (50 cm de résolution), et 2009–2010 (25 cm de résolution). Le PPNC est une mosaïque de photographies aériennes acquises entre 1994 et 2000. Les photographies aériennes acquises en 2010 n'étaient pas disponibles au début de cette étude. Le Tableau 1 résume la localisation des sites d'études, les jeux de données d'orthophotoplans relatifs ainsi que les objectifs poursuivis.

1. Objectifs poursuivis

1.1. Caractéristiques et variabilité spatiale du ravinement

Une première base de données de ravines a été créée pour trois régions agricoles contrastées situées en Wallonie. L'objectif était de définir l'étendue du ravinement, ses caractéristiques et sa variabilité spatiale en Wallonie. Cette base de données a également été utilisée pour évaluer la variabilité spatiale du seuil topographique pour l'initiation des ravines mais aussi pour déterminer les facteurs qui contrôlent l'arrêt des ravines. Les orthophotoplans 2006-2007 ont été utilisés car il s'agissait du seul jeu de données couvrant la Wallonie dans son intégralité pour une saison culturale au début de l'étude.

La sélection des sites d'études était basée sur 4 critères. 1) Les zones d'étude devaient permettre de cibler des régions agricoles contrastées. 2) Les photographies aériennes devaient être disponibles pour la période comprise entre mi-mai et le début du mois de juillet pour permettre l'observation des ravines formées dans des cultures d'hiver mais également en culture de printemps. A ces dates, les cultures de printemps sont en principes plantées et pas encore récoltées. 3) Chaque site d'étude devait être suffisamment grand pour permettre la détection de 50 à 100 ravines. 4) Les dates d'acquisition des photographies aériennes devaient être aussi proches que possible au sein d'une zone d'étude et entre les différents sites. Sur base de ces critères, 3 zones d'études ont été délimitées en Région Limoneuse, Famenne et Région Jurassique (zones #1 à #3; Figure 1). Les photographies aériennes utilisées couvraient environ 25000 à 29000 ha pour chaque zone d'étude (Tableau 2).

Tableau 1 : Objectifs poursuivis, bases de données de ravines, sites d'études et jeux de photographies aériennes liés.

Objectif(s)	Numéro de de la base de données	Site d'étude ¹	Région agricole	Jeu(x) de données de photographies aériennes
1) Etendue, caractéristiques et variabilité spatiale du ravinement et su seuil topographique pour l'initiation des ravines 2) Facteurs contrôlant l'arrêt des ravines	1	1, 2, 3	Région Limoneuse, Famenne, Région Jurassique	2006-2007
1) Variabilité du ravinement dans le temps et du seuil topographique pour l'initiation des ravines 2) Facteurs contrôlant l'arrêt des ravines	2	4	Condroz / Région Limoneuse	PPNC (1999), 2006-2007, 2009-2010
1) Evaluation de l'incertitude liée à l'identification des ravines, leurs caractéristiques et seuil topographique pour l'initiation des ravines sur base de photographies aériennes 2) Comparaisons de méthodes de prédiction pour la localisation des ravines	3	5 (zone rouge)	Région Limoneuse	2006-2007

¹Cf. Figure 1

La Région Limoneuse (#1) tire son nom du type de sol dominant résultant d'un dépôt de Loess du Quaternaire. Ces sols sont particulièrement aptes pour des cultures industrielles. De ce fait, la Région Limoneuse est caractérisée par une grande proportion de terres de culture avec une taille moyenne de parcelles relativement importante (Tableau 2). Les terres en culture sont à peu près également réparties entre cultures de printemps et cultures d'hiver. Le site d'étude est également caractérisé par un relief doux dominé par de vastes plateaux où l'on retrouve quelques vallées. Les précipitations annuelles sont d'environ 800 mm et sont relativement bien distribuées sur l'année. Leur érosivité moyenne est de 680 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹ (Sohier et al., 2009).

La Famenne (#2) est une dépression creusée dans un schiste. Elle est localisée entre le Condroz et l'Ardenne et consiste en des plateaux accidentés séparés par de vastes dépressions plates. La plupart des sols sont caillouteux. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 950 mm et sont plus importantes durant le printemps et l'été. L'érosivité annuelle est de 850 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹. Les terres agricoles occupent moins de 15% de la surface totale. La surface agricole est majoritairement occupée par des prairies. Les terres en cultures sont à peu près également réparties en cultures de printemps et cultures d'hiver. La taille moyenne des parcelles est plus faible qu'en Région Limoneuse mais leur pente moyenne est plus élevée (Tableau 2).

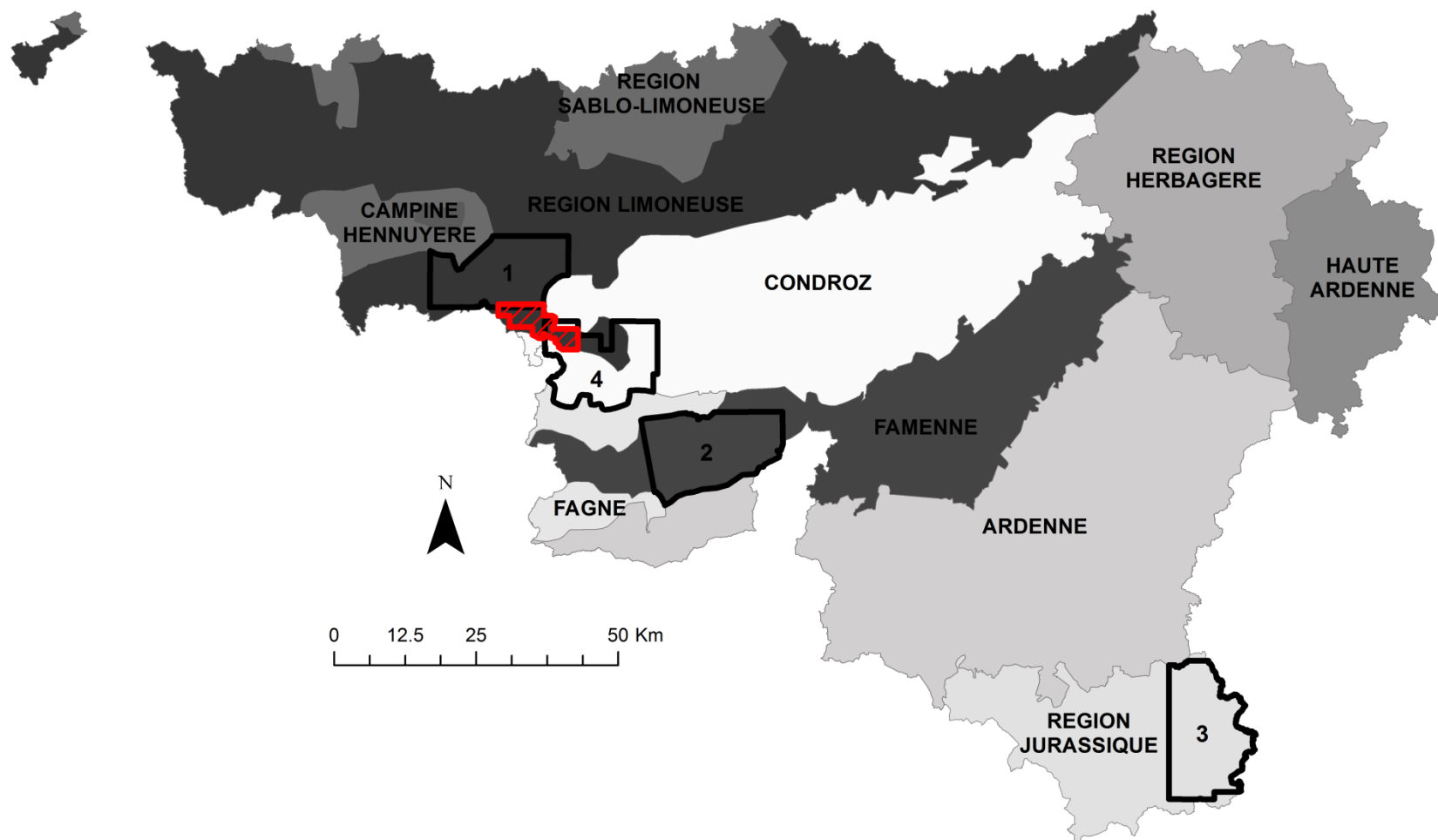


Figure 1 : Localisation des sites d'études. 1) Région Limoneuse, 2) Famenne, 3) Région Jurassique, 4) Condroz/Région Limoneuse, 5) la zone rouge est localisé en Région Limoneuse.

Tableau 2 : Sites d'études et caractéristiques des photographies aériennes utilisées

Site d'étude ¹	Région agricole	Résolution des photos aériennes	Date d'acquisition des photos aériennes	Surface totale	Surface en culture	Proportion de cultures de printemps / hiver ²	Surface en prairie	Nombre de parcelles en culture	Taille moyenne des parcelles en culture ³	Pente moyenne des parcelles en culture
			jj/mm/aaaa	ha	ha (%)	%	ha		ha	%
1	Région Limoneuse	50 cm	02/07/2006	24654	13917	46 / 54	3734	4417	3.15	3.59
2	Famenne	50 cm	17/06/2006 02/07/2006	29161	3737	42 / 58	8157	1370	2.73	4.98
3	Région Jurassique	50 cm	10/06/2006	27939	4398	45 / 55	7444	2315	1.90	6.29
		40 cm	29/07/1999		10058	38 / 62	5607	2705	3.72	4.03
4	Condroz/ Région Limoneuse	50 cm	02/07/2006	20963	10743	36 / 64	6056	2847	3.77	4.04
		25 cm	23/05/2009		11024	34 / 66	6077	2519	4.38	3.98
5 (zone rouge tirée)	Région Limoneuse	50 cm	02/07/2006	5235	3296	68 / 32	714	877	4.42	3.30

¹ voir Figure 1

² Cultures de printemps : principalement maïs, betterave, pomme de terre; les cultures d'hiver sont principalement des céréales (froment, escourgeon)

³ Parcelles cultivées = toutes les parcelles à l'exclusion des prairies et des bandes enherbées

La Région Jurassique (#2) est caractérisée par un relief prononcé avec des pentes raides. Le substrat géologique est constitué de grès, calcaire et schiste. Les précipitations annuelles sont d'environ 1100 mm avec des pluies plus importantes durant le printemps et l'été. L'érosivité moyenne des pluies est de $1360 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. On retrouve plusieurs type de sol mais ils sont principalement limoneux à argileux et souvent caillouteux. Les terres en culture occupent moins de 20% de la surface totale. La surface agricole est principalement occupée par des prairies. Les terres en culture sont à peu près également réparties entre cultures de printemps et cultures d'hiver. La taille moyenne des parcelles en culture est la plus faible des trois régions agricoles mais la pente moyenne est la plus importante.

Bien que le Condroz et la Région Sablo-Limoneuse soient également d'importantes régions agricoles (Figure 1), elles n'ont pas été incluses dans la présente étude car aucun jeu de photographies aériennes ne rencontraient l'ensemble des critères exposés ci-dessus. Les zones agricoles situées à l'Est de la Wallonie (Ardenne, Haute Ardenne, and Région Herbagère) n'ont pas été retenues car l'occupation du sol consiste presque exclusivement en prairies et forêts.

1.2. Variabilité du ravinement dans le temps

Une seconde base de données de ravines a été créée pour évaluer la récurrence du phénomène ainsi que la variabilité spatiale du seuil topographique pour l'initiation des ravines. Un site d'études pour lequel les jeux de photographies aériennes (PPNC, 2006-2007, 2009-2010) étaient disponibles à des dates d'acquisition comprises entre mi-mai et début juillet a été défini à cheval sur la Région Limoneuse et le Condroz (#4; Figure 1). L'occupation du sol et le climat y sont similaires à ceux observés en Région Limoneuse. Cependant, les cultures d'hiver sont dominantes (Tableau 2). Cette base de données a également été utilisée pour l'évaluation des facteurs contrôlant l'arrêt des ravines.

1.3. Evaluation de l'incertitude lié à la caractérisation du ravinement lors de l'utilisation de photographies aériennes et prédiction du ravinement

La troisième base de données de ravines a été créée pour évaluer dans quelle mesure la caractérisation du ravinement ainsi que le seuil topographique pour l'initiation des ravines sont dépendant de l'opérateur lorsque l'on utilise des photographies aériennes. Onze opérateurs travaillant dans des projets en rapport avec l'érosion des sols en milieu agricole ont été sélectionnés pour digitaliser et classer des ravines dans une zone localisée en Région Limoneuse (#5 – zone rouge, Figure 1 et Tableau 2). La taille de la zone d'étude a été définie de manière à permettre d'obtenir un nombre suffisant de ravines (50-100) tout en nécessitant un temps de travail de digitalisation raisonnable (2h-3h). La localisation précise de la zone a été déterminée par la disponibilité de photographies aériennes pour une période de temps comprise entre mai et juillet. Les caractéristiques de la zone d'étude sont assez proches de celles du site #1 (Figure 1) en termes de pluie et de sols. Cependant, les cultures occupaient plus de 80% de la surface agricole. De plus, les cultures étaient principalement des cultures d'été. La taille moyenne des

parcelles et leur pente moyenne étaient assez similaires à celles de la Région Limoneuse (#1) et du site à cheval sur le Condroz et la Région Limoneuse (#2). Comme à chaque ravine digitalisée peut être associé un niveau d'incertitude selon le nombre d'opérateurs l'ayant identifiée, la base de données a également été utilisée pour évaluer la performance de méthodes permettant la prédiction des ravines.

2. Création des bases de données de ravines

2.1. Identification et digitalisation des ravines

Les ravines ont été digitalisées en visualisant les photographies aériennes à une échelle recommandée de 1:2500 dans le logiciel ArcGIS. Cette échelle était un compromis entre le temps de travail nécessaire et la facilité à localiser les ravines. En effet, une échelle 1:5000 aurait permis de travailler plus rapidement mais aurait induit un risque plus important de manquer des ravines courtes et/ou étroites. Au contraire, une échelle 1:1000 aurait facilité l'identification des ravines mais aurait pris beaucoup de temps. Dans le but d'assister l'opérateur dans l'identification des ravines, des informations complémentaires ont été utilisées comme par exemple la carte topographique avec les courbes de niveau, une carte des axes de concentration du ruissellement dérivée du MNT 10 m et l'outil Steepest Path du Spatial Analyst d'ArcGIS qui définit les chemins préférentiels d'écoulement des eaux de surface.

2.2. Classification des ravines

Les ravines ont été classées en trois types (Figure 2): (1) celles localisées sur un axe de concentration du ruissellement bien définis, p.ex., un vallon sec, (2) celles localisées sur une pente sans concentration apparente du ruissellement, (3) celles causées par des facteurs anthropiques. Le type 3 correspond aux ravines causées par l'accumulation du ruissellement en bord de champ ou dû à une route, des sillons, des traces de roues ou un fossé (Vandaele et al., 1996). Au contraire, les ravines de type 1 et 2 sont des ravines qui suivent la topographie générale des lieux. La distinction entre les ravines de type 1 et 2 est fortement dépendante de la résolution du MNT et donc en quelque sorte arbitraire.

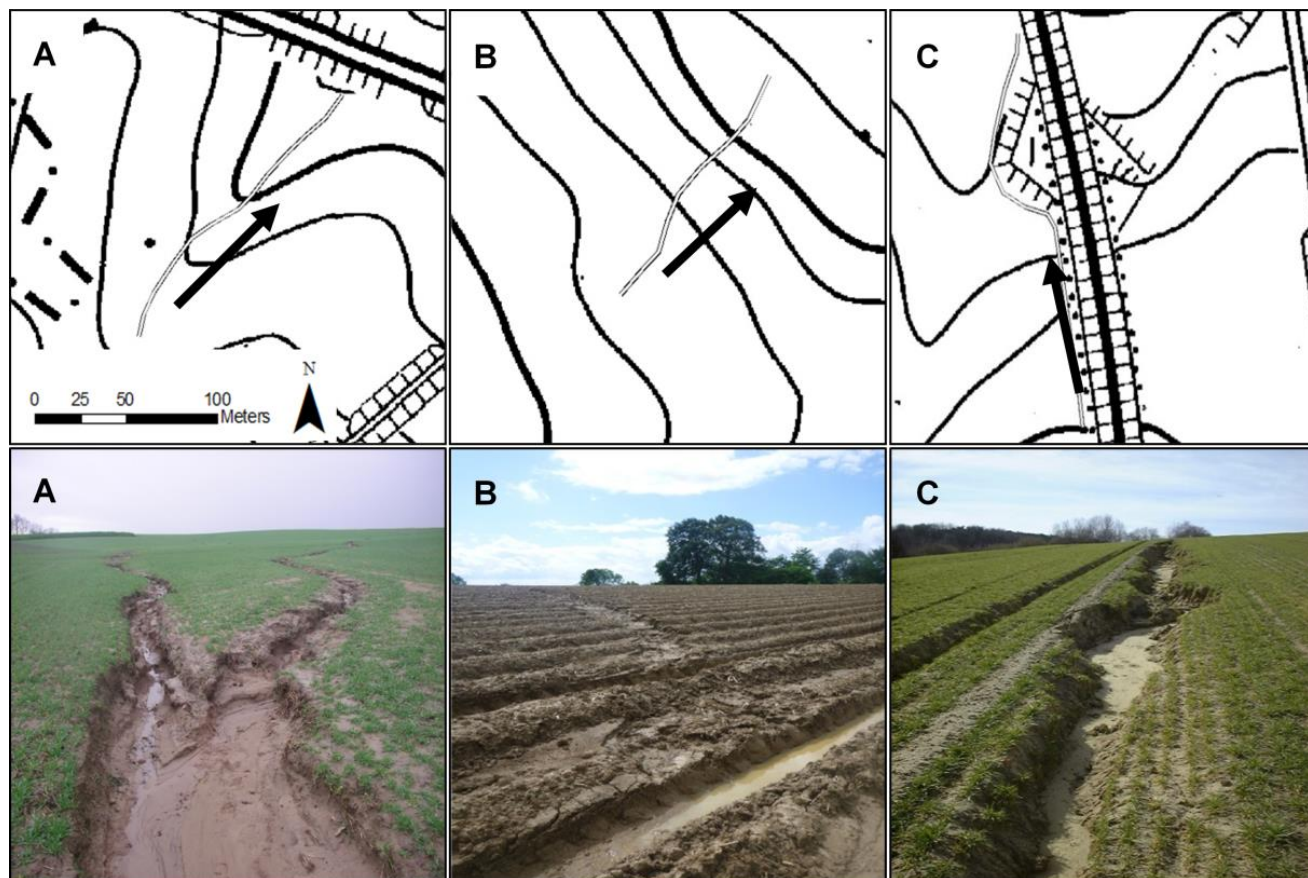


Figure 2: Types de ravines identifiées. (A) ravine localisée sur un axe de concentration du ruissellement bien défini ; les courbes de niveau indique que la ravine est dans un thalweg,(Photographie : GISER), (B) ravine localisée sur une pente sans concentration apparente du ruissellement,(Photographie : GISER), (C) exemple de ravine anthropique résultant de l'accumulation du ruissellement le long d'un talus sur le schéma et dans une trace de roue sur la photographie (Bielders, C.). Les flèches indiquent le sens d'écoulement.

Caractéristiques et variabilité spatio-temporelle des ravines en Wallonie

1. Caractéristiques des ravines dans les sites d'étude

Quel que soit le site d'étude, la proportion de ravines de type 3 est relativement bas (4% à 9%; Tableau 3). Ceci démontre que les facteurs anthropiques ne sont directement impliqués dans l'initiation des ravines que de manière limitée. Les proportions de ravines de type 1 et 2 sont relativement similaires en Région Limoneuse. En Région Jurassique, la plupart des ravines sont de type 2 alors que les ravines de type 1 dominent en Famenne. La longueur moyenne des ravines de type 2 est toujours significativement plus petite que pour les deux autres types de ravine ($p < 0.001$), ce qui est en phase avec sa définition. En effet, plus la ravine est longue, plus grande est la probabilité qu'elle rejoigne un axe de concentration du ruissellement bien identifié, auquel cas il s'agit d'une ravine de type 1. En Région Limoneuse et en Famenne les longueurs des ravines de type 1 et de type 3 ne sont pas significativement différentes ($p = 0.91$ et 0.08 , respectivement), alors qu'en Région Jurassique les ravines de type 3 sont plus longues que les ravines de type 1. Les ravines de type 1 sont plus longues de 50 m en moyenne en Région Limoneuse comparées aux autres régions ($p = 0.01$). En Région Jurassique, les ravines de type 2 sont 25 à 30 m plus courtes que dans les autres régions ($p = 0.018$).

Tableau 3: Distribution du nombre de ravine selon leur type (Figure 2) et longueur moyenne (moyenne \pm ET) pour chaque zone d'étude

			Tous types de ravine	Type 1	Type 2	Type 3
Région Limoneuse	2006–2007	Nombre	282	43%	48%	9%
		Longueur moyenne [m]	126 (± 104)	170 (± 119)	80 (± 60)	172 (± 101)
Famenne	2006–2007	Nombre	59	56%	36%	8%
		Longueur moyenne [m]	107 (± 73)	117 (± 81)	75 (± 37)	177 (± 68)
Région Jurassique	2006–2007	Nombre	161	37%	59%	4%
		Longueur moyenne [m]	84 (± 100)	122 (± 101)	50 (± 33)	233 (± 280)
	1999	Nombre	113	70%	23%	7%
		Longueur moyenne [m]	145 (± 144)	173 (± 153)	54 (± 36)	159 (± 137)
Condroz / Région Limoneuse	2006–2007	Nombre	153	63%	30%	7%
		Longueur moyenne [m]	151 (± 142)	200 (± 149)	60 (± 52)	251 (± 159)
	2009–2010	Nombre	102	44%	50%	6%
		Longueur moyenne [m]	119 (± 149)	193 (± 196)	54 (± 36)	113 (± 63)

Le nombre le plus important de ravines par unité de surface agricole (fréquence de ravines) a été observé en Région Limoneuse (Tableau 4). La fréquence de ravines par unité de surface agricole est similaire en Région Jurassique mais est environ 3 fois moins importante en Famenne. La fréquence des ravines par unité de surface en culture est la plus importante en Région Jurassique. Elle est presque deux fois supérieure aux autres régions. La longueur de ravines par unité de surface en culture (densité de ravines) varie d'un facteur 2 entre les régions. Elle est la plus importante en Région Jurassique et la plus faible en Famenne (Tableau 4).

Tableau 4: Fréquence (nombre de ravines par hectare) et densité (longueur de ravines par hectare) de ravines par unité de surface agricole (SAU) et par unité de surface en culture pour chaque site d'étude

Région agricole	Nombre de ravines par unité de surface agricole	Nombre de ravines par unité de surface cultivée	Longueur de ravines par unité de surface agricole	Longueur de ravines par unité de surface cultivée
	ha ⁻¹	ha ⁻¹	m ha ⁻¹	m ha ⁻¹
Région Limoneuse	0.016	0.020	2.02	2.56
Famenne	0.005	0.016	0.53	1.69
Région Jurassique	0.014	0.037	1.14	3.08

Le type de culture au point d'incision et le long de la ravine a été relevé pour chaque ravine. Dans tous les sites d'étude, les cultures au point d'incision et le long des ravines sont principalement des cultures de printemps (betterave, maïs et pomme de terre; Tableau 5). La fréquence des ravines et leur densité sont plus faibles en céréales qu'en culture de printemps. Ce constat d'une plus grande sensibilité des cultures de printemps au ravinement est en accord avec d'autres études menées en Belgique (p.ex., Evrard et al., 2007), qui reportent de plus haut taux d'érosion à la fin du printemps et au début de l'été dus à un effet combiné de pluies intenses et d'un couvert végétal faible dans les champs récemment emblavés. Des cultures de printemps comme la pomme de terre ou le maïs présentent en effet de larges espaces entre les lignes de semis avec un faible couvert végétal pendant 1 à 2 mois après la mise en place de la culture.

Pour les sites d'étude #1 à #3, la plupart des ravines sont restreintes à une seule parcelle, 16% à 19% des ravines se propagent sur 2 parcelles différentes et 7% à 10% se propagent sur au moins 3 parcelles différentes. Ceci met en évidence que les limites de parcelles sont propices à l'arrêt des ravines à la fois en raison de changements de végétation et d'effets anthropiques.

Le nombre et la longueur de ravine plus importants en Région Limoneuse (Tableau 3) peuvent être attribués à la part importante de parcelles cultivées (56% de la surface totale et 80% de la surface en agricole, Tableau 2), à la sensibilité des sols limoneux à l'érosion (p.ex., Vandaele et

al., 1996) et à la taille moyenne des parcelles relativement importantes. Parmi les cultures de printemps, la plupart des ravines se retrouvent en betterave en Région Limoneuse (Tableau 5). Ceci peut s'expliquer par le fait que la date de semis des betteraves est environ un mois et demi plus tôt (fin mars) que pour les pommes de terre ou le maïs (fin avril-début mai), ce qui augmente la probabilité d'observer des ravines. De plus, les cultures de printemps en Région Limoneuse sont principalement des cultures de betterave.

Tableau 5: Fréquence (nombre de ravines par hectare) et densité (longueur de ravines par hectare) des ravines pour différents types de culture

		Maïs	Céréale d'hiver	Céréale de printemps	Pomme de terre	Betterave	Autres types de culture
Région Limoneuse	Fréquence des ravines [ha ⁻¹]	0.031	0.001	0.002	0.030	0.065	0.006
	Densité des ravines [m ha ⁻¹]	4.24	0.10	0.14	2.77	8.47	0.75
Famenne	Fréquence des ravines [ha ⁻¹]	0.031	0.005	0.000	0.000	0.061	0.000
	Densité des ravines [m ha ⁻¹]	3.75	0.51	0.00	0.00	4.77	0.03
Région Jurassique	Fréquence des ravines [ha ⁻¹]	0.087	0.014	0.007	0.042	0.047	0.001
	Densité des ravines [m ha ⁻¹]	7.63	0.86	0.88	2.72	2.99	7.63

Le nombre absolu de ravines est plus faible en Famenne qu'en Région Limoneuse (Tableau 3) mais leur fréquence en culture est similaire (Tableau 4). Le plus faible nombre de ravines peut être attribué à la faible surface en culture. Par contre, la plus faible densité des ravines par unité de surface cultivée peut être attribuée à la plus faible taille des parcelles en moyenne. Comme en Région Limoneuse, les ravines sont principalement situées en betterave. Cependant la longueur de ravines retrouvée en betterave est similaire à celle retrouvée en maïs (Tableau 5). Aucune ravine n'a été observée en culture de pommes de terre car seulement 2.8 ha était cultivé en 2006.

La Région Jurassique semble être la région la plus sensible au ravinement au regard des fréquences et densités de ravines en culture (Tableau 4), et ce malgré la date d'acquisition des photographies aériennes jusqu'à trois semaines plus tôt que dans les autres régions, ce qui diminue en principe la probabilité d'observer des ravines. Les ravines sont principalement

localisées en maïs (Tableau 5) bien que les photographies aériennes aient été prises le 10 juin soit environ un mois seulement après leur implantation. La culture de maïs est toutefois la culture de printemps la plus importante dans cette région agricole. L'occurrence de 2 événements pluvieux majeurs successifs (21 and 25 mm respectivement le 16 et le 20 mai) peut expliquer en partie ce taux important de ravinement dans la Région Jurassique. L'importante proportion de ravines de type 2 (Tableau 3) peut être directement relié à la longueur moyenne des axes de concentration (aire contributive ≥ 1 ha) en culture qui est plus faible que dans les autres régions agricoles (26 m ha⁻¹ vs. 43 m ha⁻¹).

2. Evaluation de la récurrence du ravinement

Le nombre de ravines est le plus important pour le jeu de photographies aériennes 2006-2007 et le plus faible pour 2009-2010 (Tableau 3). Le plus faible nombre de ravines en 2009-2010 peut s'expliquer en partie par la date d'acquisition des photographies aériennes qui est survenu plus tôt dans l'année que pour les autres photographies aériennes. Les événements pluvieux plus importants en mai 2006 peuvent quant à eux expliquer le nombre de ravines plus important en 2006-2007 (Figure 3). D'importants événements pluvieux ont également eu lieu en 1999 mais ils sont survenus plus tard dans la saison (juin) lorsque que le couvert végétal de la plupart des cultures de printemps est déjà important. Bien que les proportions de ravines selon leur type varient d'une année à l'autre, les ravines de type 1 représentent toujours la plus grande longueur cumulée (Tableau 3).

Lorsque l'on compare les jeux de données de photographies aériennes 2 à 2, on observe que la récurrence des ravines au même emplacement varie de 17% à 38%. Les ravines récurrentes sont principalement des ravines de type 1 (82% à 91%), ce qui démontre l'importance des facteurs topographiques dans l'initiation et la localisation des ravines. Cependant, seulement 12% à 18% des ravines observées à partir d'un jeu de données de photographies aériennes se retrouvent également dans les deux autres jeux de données. Les facteurs topographiques ne sont donc clairement pas suffisants pour expliquer l'initiation des ravines et d'autres facteurs comme l'occupation du sol (Tableau 5) et la pluie jouent un rôle majeur.

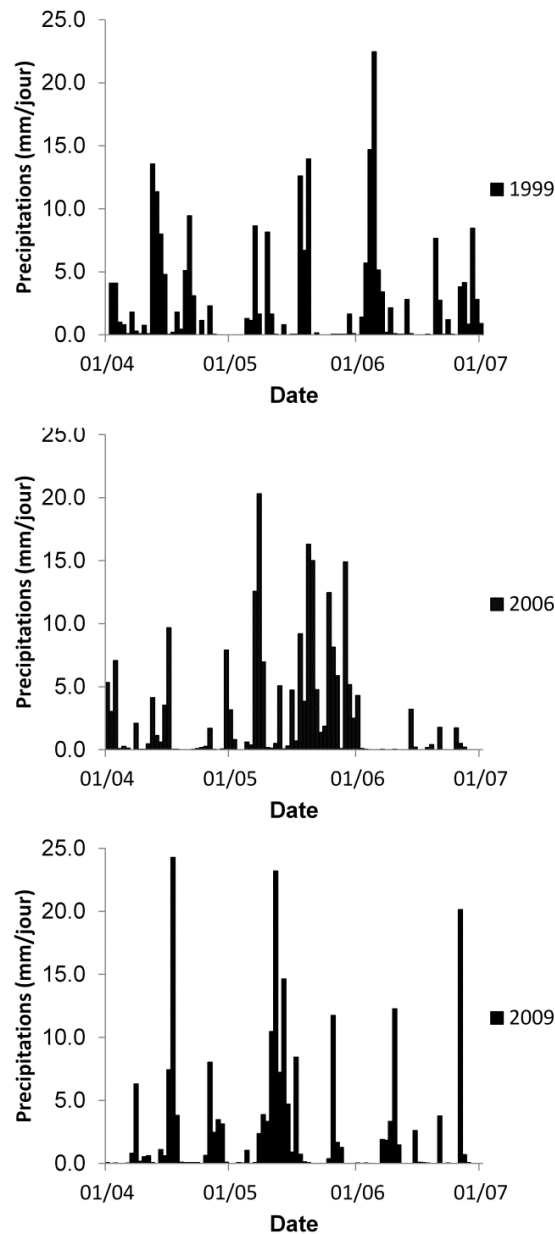


Figure 3: Précipitations journalière d'avril à juillet en (A) 1999, (B) 2006 et (C) 2009 dans la zone #4 (source : réseau SETHY, Direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques, SPW)

3. Conclusions

Le ravinement en terres de culture est très variable en termes de nombre et longueur de ravines entre les différentes régions agricoles de Wallonie. Ceci semble résulter des effets combinés de différences en termes d'occupation du sol, de type de culture, de taille moyenne des parcelles, de topographie, de sol et de pluie. Dans toutes les régions agricoles, l'initiation de la plupart des ravines dépend de facteurs topographiques. Seuls 9% peuvent être liés à des facteurs anthropiques (sillons, traces de roue, talus...). La récurrence des ravines à un même emplacement sur trois années est limitée. Ceci s'explique par les changements d'assolement et la variabilité du climat.

Analyse du seuil topographique pour l'initiation des ravines

Le seuil topographique rend compte des contextes topographiques favorables à l'initiation des ravines. Il se base sur les valeurs d'aire contributive et de pente identifiées au point d'incision des ravines (tête de ravine). Sur base des combinaisons de pente et d'aire contributive d'un grand nombre de ravines, il est possible de définir dans un graphique à échelle logarithmique une droite en deçà de laquelle le ravinement ne se produit pas et au-delà de laquelle le ravinement est possible mais pas systématique (Figure 4). Les seuils topographiques s'expriment par l'équation suivante :

$$S = a A^b \quad \text{(Equation 1)}$$

où S et A sont respectivement la pente ($m.m^{-1}$) et l'aire contributive (ha) au point d'incision de la ravine, a est un coefficient et b un exposant.

Deux approches principales ont été utilisées pour définir le seuil topographique. La première (Patton and Schumm, 1975) consiste à faire passer une droite à travers les points les plus bas du nuage de points représentés dans un graphique à échelle logarithmique. Cette méthode est problématique car objectivement plusieurs seuils peuvent être définis (Figure 4A), et que le seuil est très sensible aux valeurs extrêmes (Figure 4B). De plus, cette approche ne repose sur aucun fondement statistique. La seconde méthode basée sur la régression orthogonale du nuage de points a été proposée par Vandekerckhove et al. (1998) et Vanwalleghem et al. (2005). Après avoir déterminé la pente de la droite de la régression orthogonale, Vanwalleghem et al. (2005) ajustent la position du seuil topographique de manière à ce que tous les points exceptés les valeurs extrêmes tombent au-dessus du seuil (Figure 4C). Aucune approche statistique n'est utilisée pour identifier les valeurs extrêmes. Suivant la méthode de Vandekerckhove et al. (1998), le seuil topographique correspond à la limite inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de la droite de régression orthogonale (Figure 4C). Les seuils définis par Vandekerckhove et al. (1998) et Vanwalleghem et al. (2005) reflètent le comportement moyen du nuage de points plutôt que le comportement moyen des points à la limite du nuage de points car ils reposent sur la régression orthogonale. Ceci n'est donc pas très cohérent avec le concept de 'seuil'. En effet, la ligne définie comme seuil devrait refléter la distribution des points dans son voisinage immédiat et pas la distribution de l'ensemble des points.

Nous proposons donc de tester une nouvelle méthode basée sur la régression quantile pour la détermination du seuil topographique. Cette méthode est basée sur une fonction d'optimisation qui minimise la somme des résidus absolus pondérés pour un quantile donné, où les poids sont des fonctions asymétriques du quantile (Cade et Noon, 2003). Elle s'applique aussi bien aux distributions univariées qu'aux distributions à deux variables. Pour un quantile α donné, par exemple $\alpha = 10\%$, la régression quantile définit une ligne droite en dessous de laquelle la probabilité d'observer une valeur est α . Saito et al. (2010) ont récemment appliqué la régression quantile afin d'identifier les seuils d'intensité-durée de précipitations pour les glissements de

terrain. A notre connaissance, la régression quantile n'a pas encore été utilisée pour définir des seuils de ravinement. Pour plus d'informations concernant la régression quantile, le lecteur est renvoyé à Koenker et Hallock (2001).

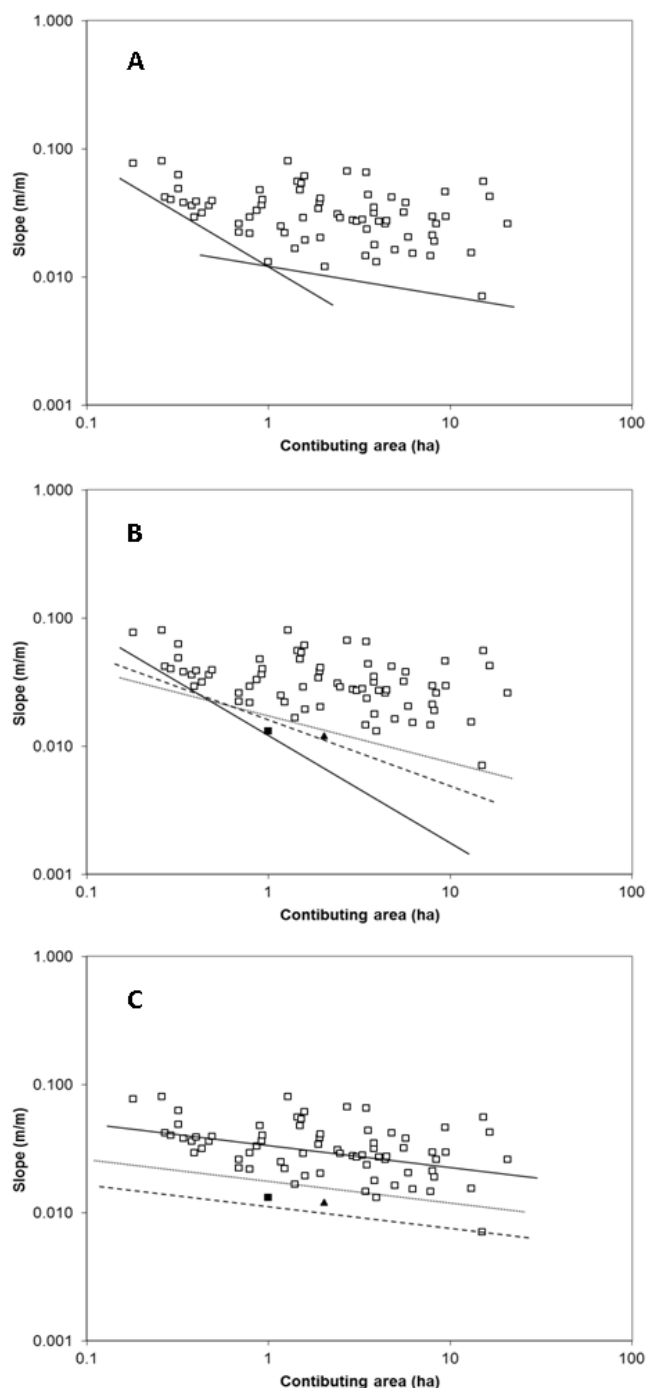


Figure 4: Comparaison de différentes méthodes de seuillage pour un jeu de données fictif. a) méthode de Patton & Schumm (1975): plusieurs seuils peuvent exister. b) méthode de Patton & Schumm (1975): sensibilité aux valeurs extrêmes. Les trois lignes sont tracées après l'exclusion de 0 (trait plein), 1 (ligne pointillée) ou 2 (ligne pointillée) points de données extrêmes (symboles plein). c) Méthodes basées sur la régression orthogonale. Ligne continue: régression orthogonale, ligne pointillée: translation de la régression orthogonale jusqu'au point le plus bas tout en maintenant la pente constante (Vanwalleghe et al., 2005.), ligne en pointillé: méthode de Vandekerckhove et al. (1998) où le seuil correspond à la limite inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de la régression orthogonale. Slope= Pente et Contributing area = Aire contributive

L'objectif est ici multiple. Il s'agit de (i) comparer les méthodes de seuillage et notamment d'évaluer la méthode basée sur la régression quantile; (ii) évaluer la variabilité régionale du seuil topographique dans les zones #1 à #3 (Figure 1); et (iii) évaluer la stabilité temporelle du seuil topographique dans la zone #4.

Les bases de données de ravines # 1 et # 2 (Tableau 1) ont été utilisées pour définir et analyser les seuils topographiques pour l'initiation des ravines. Seules les ravines de type 1 (Figure 2) ont été utilisées. Les ravines de type 2 n'ont pas été retenues parce qu'il n'est pas possible de définir avec précision leur aire contributive compte tenu de la résolution actuelle du MNT. Les ravines de type 3 ont également été exclues de l'analyse du seuil topographique. En effet, les propriétés mécaniques du sol qui régissent la formation des ravines (par exemple, la cohésion du sol) dans les traces de roues, sillons de labour ou fossés peuvent différer des propriétés du sol de la couche arable des champs cultivés. Cela est particulièrement vrai pour les ravines éphémères formées au printemps et en été, dont la profondeur est généralement limitée à la couche arable (Nachtergaele et al., 2002). En outre, l'aire contributive des ravines de type 3 peut différer sensiblement de l'aire contributive topographique.

Les valeurs de pentes ont été extraites de la carte des pentes dérivée du MNT. Les valeurs d'aire contributive sont extraites du raster d'accumulation de flux dérivé du raster de direction de flux sur base de la méthode D8. Les valeurs d'aires contributives au point d'incision des ravines obtenues à partir du raster d'accumulation de flux ne sont pas toujours en phase avec les aires contributives délimitées manuellement sur base des courbes de niveau de la carte topographique (Figure 5). Un biais moyen de 38% est observé. Cependant, le biais entre les deux approches peut être minimisé par la recherche de la valeur maximale de l'aire contributive dans un rayon de 15 m autour du point d'incision de la ravine (Figure 5). Toutefois, cela peut encore conduire à des erreurs importantes dans certains cas au regard de l'écart-type fourni. Un rayon de 25 m permet de minimiser à la fois le biais et l'erreur type. Ce rayon a donc été utilisé pour déterminer l'aire contributive pour tous les points d'incision de ravine.

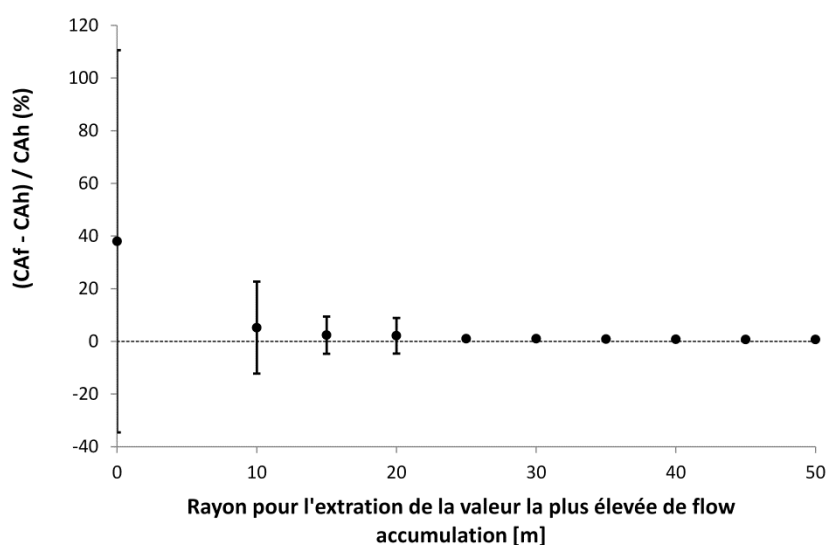


Figure 5: Différences entre les valeurs d'aire contributive obtenues sur base d'une délimitation manuelle à partir des courbes de niveau de la carte topographique (CAh, valeur de référence) et celles obtenues à partir du raster d'accumulation de flux (CAf). Ces derniers sont obtenus en recherchant l'aire contributive maximum dans un rayon donné autour du point d'incision de la ravine.

1. Comparaisons des méthodes de seuillage

Le seuil topographique établi avec la méthode de Patton et Schumm (1975) est très sensible à la précision de la localisation du point d'incision de la ravine, c'est-à-dire aux valeurs de pente et d'aire contributive résultantes, car dans de nombreux cas le seuil ne dépend que de deux points. Il est également sensible aux valeurs extrêmes. Sur la Figure 6, le seuil serait très différent après le retrait du point le plus bas. La méthode de Vanwallegghem et al. (2005) est plus robuste car elle repose sur la minimisation des carrés des résidus mais elle reste sensible aux valeurs extrêmes. Par exemple, la position du seuil topographique sur la Figure 6 est très éloignée de la limite inférieure du nuage de point pour la Région Limoneuse. La méthode de Vandekerckhove et al. (1998) corrige en partie ce défaut en plaçant à 95% le seuil de la limite inférieure de l'intervalle de confiance de la régression orthogonale. Cependant, la limite inférieure tend à descendre lorsque la taille de l'ensemble de données est faible ou lorsque que la corrélation entre la pente et l'aire contributive est faible. Paradoxalement, des régressions avec de grandes incertitudes amènent donc à la prédiction d'un plus large éventail de conditions topographiques favorables à l'initiation des ravines que si l'incertitude est faible.

Contrairement aux autres méthodes, la régression quantile reflète le comportement des points situés à proximité du seuil. En outre, les estimations de la régression quantile sont robustes à la présence de valeurs aberrantes (John et Nduka, 2009). Toutefois, plutôt que d'utiliser un quantile fixe pour tous les ensembles de données, α peut varier. Le calcul des intervalles de confiance de a et b (Equation 1) pour une gamme de quantiles permet de définir le quantile le plus extrême pour lesquels les paramètres de régression peuvent être estimés avec une précision acceptable (Cade et Noon, 2003) sur base de leur intervalle de confiance à 90% calculé à partir de la méthode de test du score de rang (Koenker, 1994). Il s'agit du quantile α le proche possible de 0. En outre, l'intervalle de confiance de l'exposant b (pente du seuil) ne doit pas inclure 0. Les paramètres a et b et leurs intervalles de confiance ont été calculés pour les quantiles de 0,01 à 0,50 avec une augmentation de 0,01 (Figure 7). Le quantile présentant des intervalles de confiance acceptables à la fois pour a et b sont 0,06 pour la Région Limoneuse, 0,17 pour la Famenne et 0,13 pour la Région Jurassique.

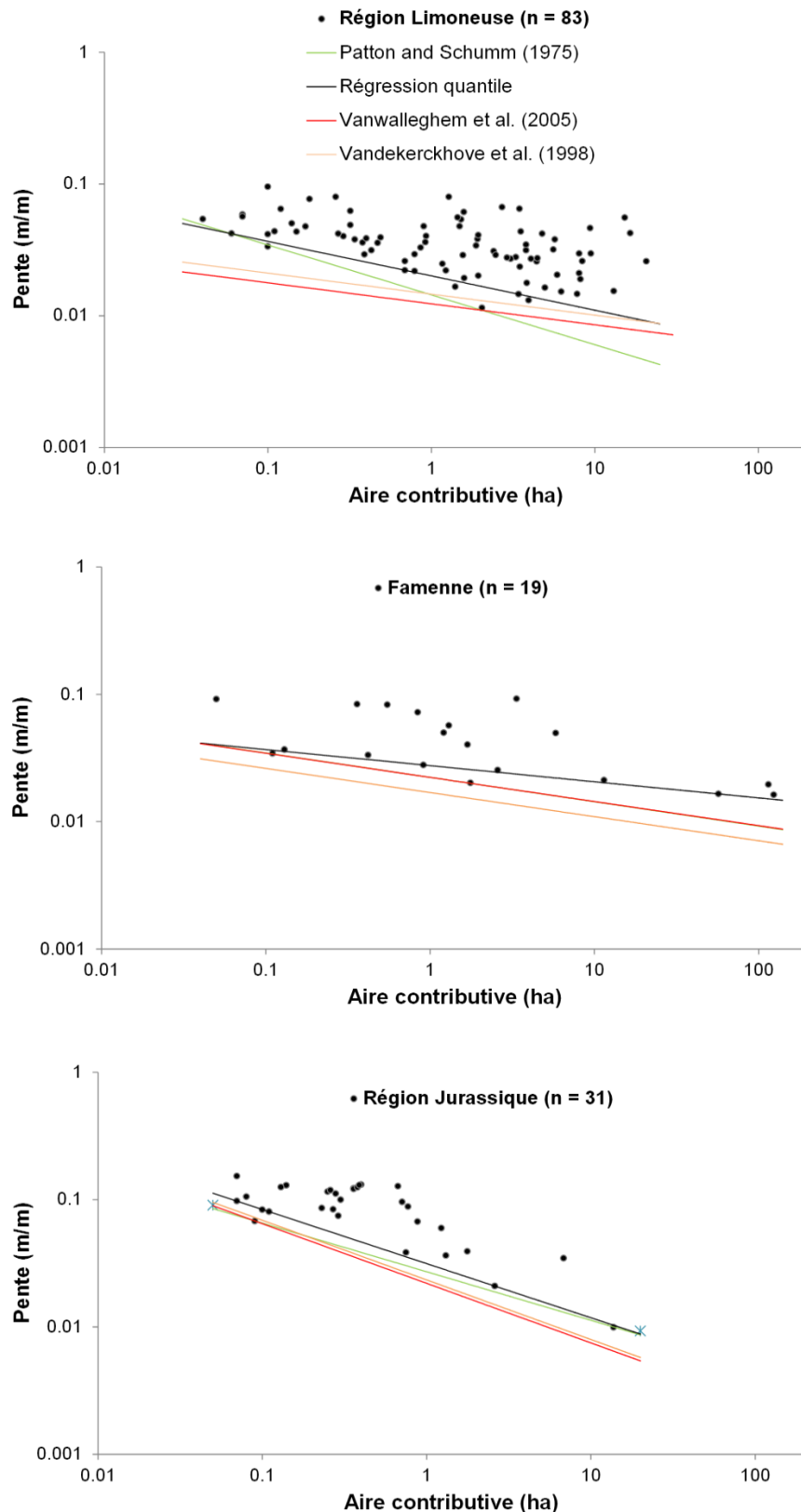


Figure 6: Les 4 méthodes de seuillage appliquées pour les ensembles de données relatifs aux ravines de type 1 en (A) Région Limoneuse, (B) Famenne et (C) Région Jurassique. La régression quantile est calculée respectivement pour $\alpha = 0,06$, $0,17$, et $0,13$ pour la Région Limoneuse, la Famenne et la Région Jurassique. Ces valeurs correspondent aux quantiles les plus extrêmes pour lesquelles les paramètres de la régression peuvent être estimés avec une précision acceptable. Notez que pour la Famenne, le seuil basé sur les méthodes de Patton et Schumm (1975) et Vanwalleghe et al. (2005) sont superposés.

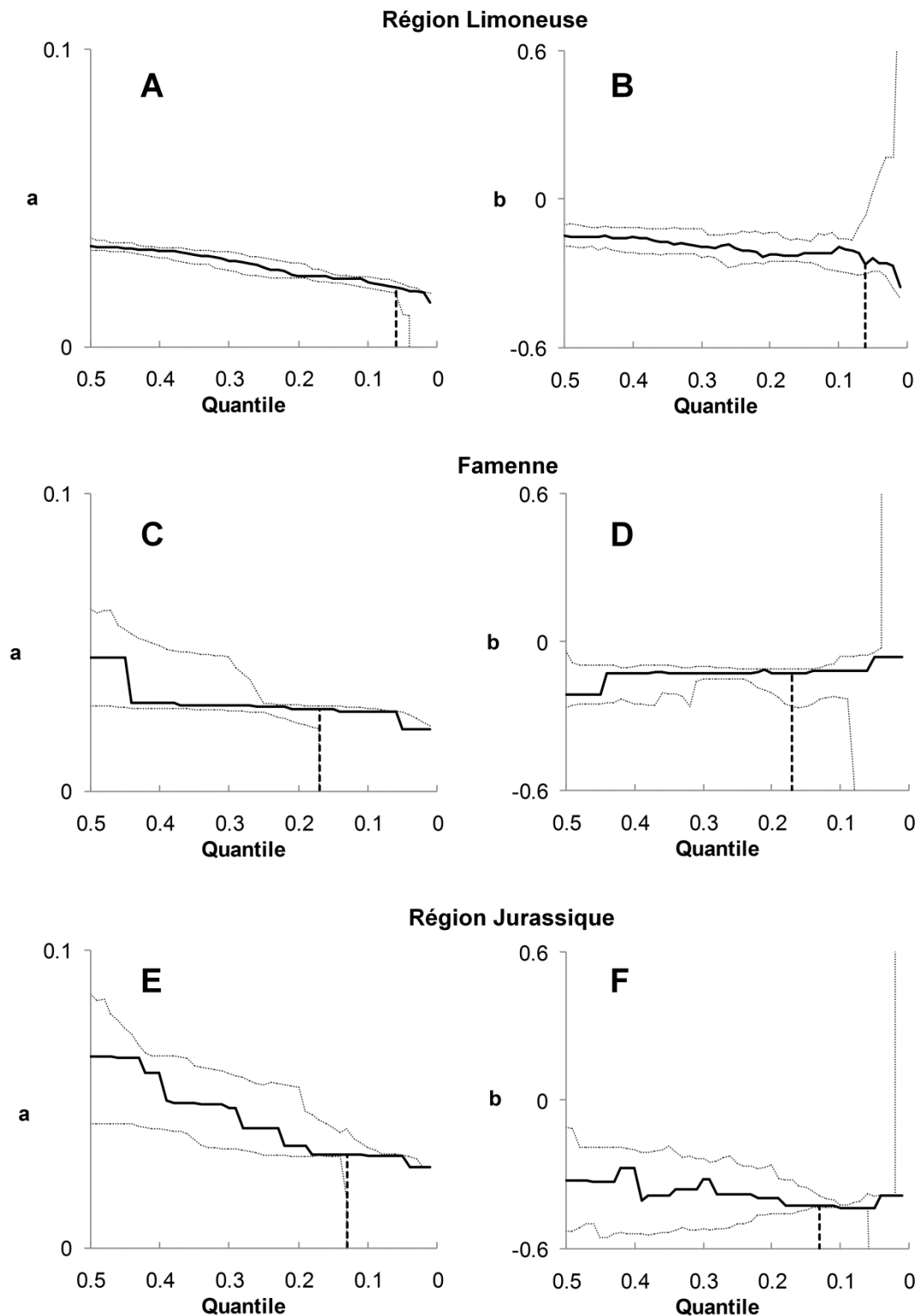


Figure 7: Estimations des paramètres a et b du seuil topographique (Equation) en utilisant la régression quantile pour des quantiles compris entre 0,01 et 0,5 (traits pleins) pour la Région Limoneuse (A et B), la Famenne (C et D) et la Région Jurassique (E et F). Les lignes grises représentent les intervalles de confiance à 90%. Les lignes verticales en pointillés marquent le quantile le plus extrême pour lesquels les intervalles de confiance des deux paramètres de la régression peuvent être estimés avec une précision acceptable.

La méthode de la régression quantile semble être la plus robuste et celle qui reflète au mieux les conditions topographiques limites pour l'initiation des ravines. Les seuils définis par la régression quantile sont généralement mieux ajustés à la limite inférieure du nuage de point. Cependant, les caractéristiques du jeu de données qui peuvent être utilisés pour la régression affectent la valeur du quantile et donc la position du seuil. En particulier, le nombre de points du jeu de données semble affecter le quantile qui peut être utilisé pour définir le seuil. Plus le nombre de points du jeu de données est faible, plus le quantile pour définir le seuil est haut (Figure 8), et plus la gamme de conditions topographiques favorables à l'initiation des ravines est restreinte. L'inconvénient de faire varier le quantile est que cela empêche une comparaison rigoureuse des paramètres de régression pour les trois zones d'étude. Cependant, l'utilisation d'un quantile fixe (par exemple, 0,1) peut entraîner une très grande incertitude sur les paramètres de la régression en Famenne ou en Région Jurassique. Pour de meilleures performances et une comparaison fiable des jeux de données, des jeux de données d'au moins 50 points semblent nécessaires (Figure 8).

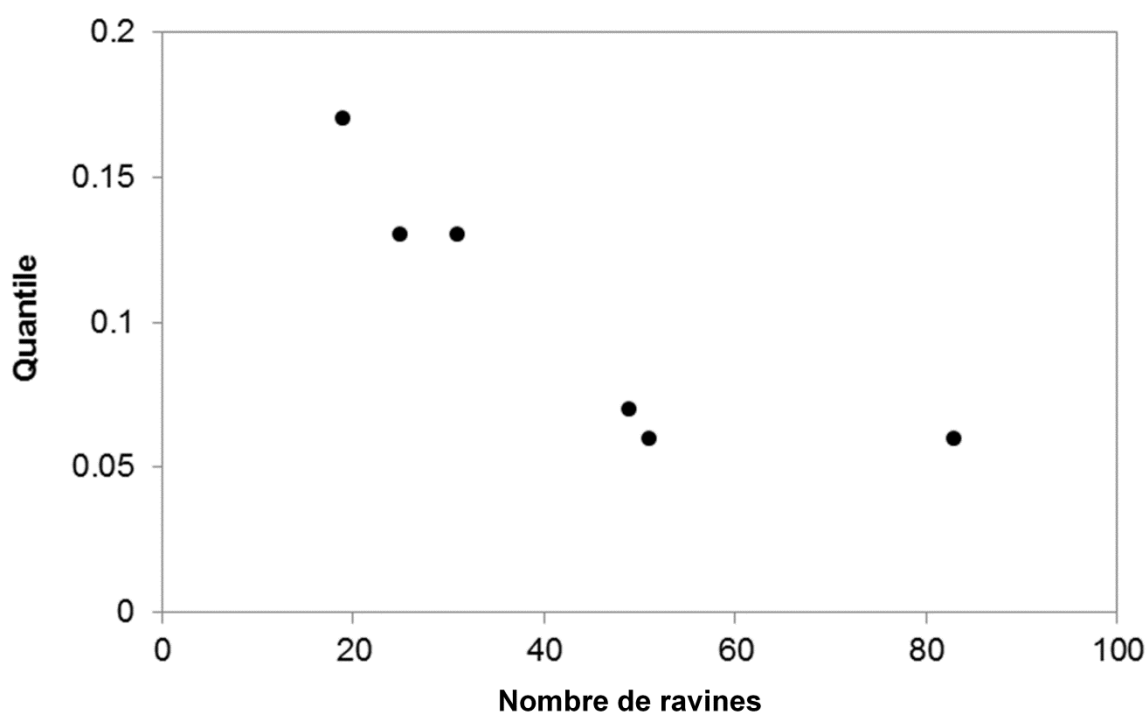


Figure 8: Relation entre le quantile le plus extrême qui peut être utilisé avec une précision acceptable pour la régression quantile et le nombre de ravines dans chaque jeu de données pour les six séries de données utilisées dans cette étude. (Région Limoneuse, Famenne, Région Jurassique, Condroz /Région Limoneuse (1999, 2006-2007, 2009-2010).

2. Différences régionales

La Figure 9 montre les intervalles de confiance à 90% pour les paramètres a et b des seuils topographiques déterminées en utilisant la régression quantile. La valeur du paramètre a est la

plus faible pour la Région Limoneuse. Cependant ce paramètre est similaire à celui de la Famenne et de la Région Jurassique puisqu'il y a un chevauchement entre les intervalles de confiance à 90%. Les paramètres b de la Région Limoneuse et de la Famenne sont également similaires.

Nous en concluons donc qu'il n'y a pas de différence significative entre les seuils topographiques de ces deux régions agricoles, malgré des différences dans le nombre absolu de ravines (Tableau 3), et que les contextes topographiques favorables à l'initiation des ravines sont très similaires pour ces deux zones. Cependant, les ravines de type 1 ont en moyenne en Famenne de plus grandes aires contributives qu'en Région Limoneuse. L'aire contributive moyenne est de $17,3 \pm 37,1$ ha (moyenne \pm écart-type) en Famenne et de seulement $3,1 \pm 3,9$ ha dans la Région Limoneuse. L'aire contributive maximum retrouvée en Famenne est de 123,6 ha contre 20,7 ha en Région Limoneuse. Cela peut être attribué à la nature pierreuse des sols en Famenne. Selon Vandaele et al. (1996), l'aire contributive pour une pente donnée est systématiquement plus grande lorsque les sols présentent une charge caillouteuse importante. Ils sont en effet moins sensibles à l'érosion en raison d'une résistance plus élevée à l'écoulement que les sols non caillouteux. Ceci réduit donc la capacité de détachement et de transport du ruissellement (Govers et al., 1990). En outre, les forêts occupent une surface importante en Famenne et ont tendance à générer moins de ruissellement que les terres cultivées. De ce fait, une aire contributive plus importante est nécessaire pour générer un volume de ruissellement suffisant pour amorcer le ravinement.

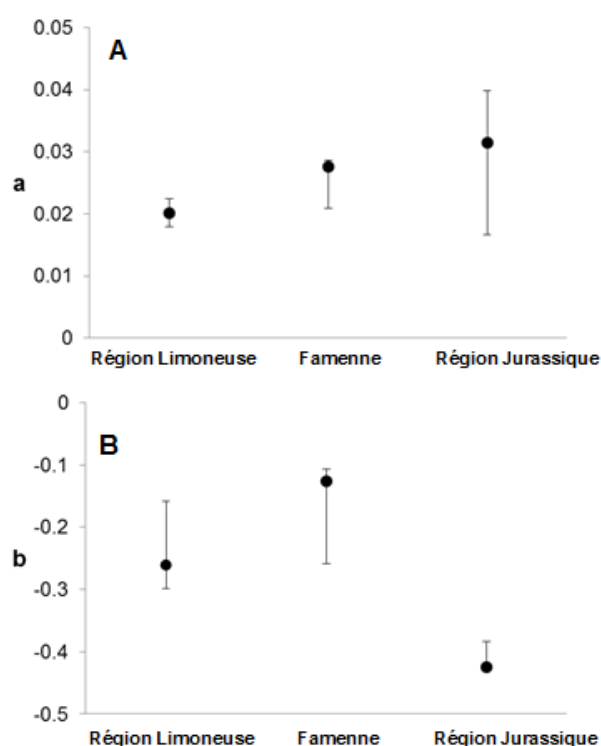


Figure 9: Comparaison des valeurs des paramètres (A) a (ordonnée à l'origine) et (B) b (pente) du seuil topographique (Equation 1) pour les sites d'études #1 to #3. Ces valeurs correspondent au quantile le plus extrême pour lequel les intervalles de confiance à 90% sur les paramètres sont estimés acceptables. Les barres verticales correspondent aux intervalles de confiance à 90% calculés avec la méthode du test de score de rang.

L'exposant b du seuil topographique de la Région Jurassique diffère de celui de la Région Limoneuse et de la Famenne (Figure 9) Ceci signifie que la pente du seuil topographique en Région Jurassique est plus élevée que pour les deux autres régions, notamment en raison de points d'incision avec de faibles valeurs d'aire contributive mais localisés sur de fortes pentes que l'on ne retrouve pas en Région Limoneuse et en Famenne (Figure 6). La Région Jurassique se caractérise en effet par un relief plus prononcé avec des pentes raides, tandis que le relief de la Région Limoneuse et de la Famenne est caractérisé par de vastes terrains faiblement vallonnés. Les localisations en terre de culture avec des aires contributives comprises entre 0,05 et 0,2 ha présentent des valeurs médianes de 3,3%, 4,2% et 6,2% respectivement pour la Région Limoneuse, la Famenne et la Région Jurassique. Les percentiles 10 sont respectivement de 1,5%, 1,6% et 2,9%, et les percentiles 90 de 6,7%, 9,2% et 13%. Cela implique que, pour une même aire contributive, le ravinement est susceptible d'être initié sur des pentes plus raides en Région Jurassique.

Une analyse de la variabilité régionale du seuil topographique basée sur l'une ou l'autre des trois autres méthodes de seuillage amène à des conclusions différentes. En utilisant la méthode de Patton et Schumm (1975), la Région Limoneuse et la Région Jurassique présentent des valeurs de b similaires et ne diffèrent que par leur valeur de paramètre a . La valeur de b de la Famenne est quant à elle deux fois plus faible que pour les deux autres sites d'étude. Les tendances régionales en utilisant les méthodes de Vanwallegghem et al. (2005) et de Vandekerckhove et al. (1998) sont assez similaires à la méthode de régression quantile mais il y a de grandes différences en valeur absolue des paramètres par rapport à la régression quantile. Les valeurs du paramètre b sont très similaires pour la Région Limoneuse) et la Famenne (-0.16 -0.19) et 2,5 à 3 fois plus faible que pour la Région Jurassique (-0,47) en utilisant la méthode de Vandekerckhove et al. (1998). Pour la méthode Vanwallegghem et al. (2005), les valeurs du paramètre a de la Famenne et de la Région Jurassique sont les mêmes (0,022), mais sont près de deux fois plus grands qu'en Région Limoneuse (0,012). Les différences régionales sont les plus faibles lorsque l'on considère la méthode de Vandekerckhove et al. (1998).

Tableau 6: Paramètres a et b des seuils topographiques (Equation. 1) obtenus par la méthode de Patton et Schumm (1975), par régression orthogonale selon Vandekerckhove et al. (1998) ou Vanwallegghem et al. (2005), et par régression quantile.

	Méthode de Patton and Schumm (1975)		Méthode de la régression orthogonale (Vandekerckhove et al., 1998)		Méthode de la régression orthogonale (Vanwallegghem et al., 2005)		Méthode de la régression quantile	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Région Limoneuse	0.014	-0.38	0.015	-0.16	0.012	-0.16	0.020	-0.26
Famenne	0.022	-0.19	0.017	-0.19	0.022	-0.19	0.028	-0.13
Région Jurassique	0.027	-0.38	0.023	-0.47	0.022	-0.47	0.032	-0.43

3. Comparaison avec des seuils topographiques provenant d'autres sites d'étude

Les paramètres a et b d'études antérieures ont été rassemblés (Tableau 7). Vandaele et al. (1996) ont utilisé la méthode de Patton et Schumm (1975) et interprètent la valeur du paramètre a en termes de processus d'érosion. Ils suggèrent que de faibles valeurs de a (p.ex., $a = 0,0035$ en Belgique central) sont liées à de l'érosion en rigoles tandis que les valeurs élevées (p.ex., $a = 0,35$; Montgomery et Dietrich, 1988) sont relatifs à des ravines initiées par de petits glissements de terrain. Des valeurs intermédiaires, telles que retrouvées dans notre étude (de 0,014 à 0,027; Tableau 6), correspondent à du ravinement. Selon Patton et Schumm (1975), si une contrainte de cisaillement critique plus élevée est nécessaire pour initier le ravinement cela se traduirait par une valeur plus élevée du coefficient a . Par conséquent, en plus d'être sensible à la forme de l'érosion, le coefficient a serait également lié à la géologie, aux sols, au climat et à la végétation. Sur base de considérations théoriques, Schumm (1979) suggère que le paramètre b doit être compris entre -0,20 et -0,40. Selon la revue bibliographique effectuée par Vandaele et al. (1996), les valeurs de b rapportées dans la littérature pour des ravines se situent entre -0,30 et -0,40 en Europe et aux Etats-Unis et sont indépendantes des conditions propres à chaque site. Les valeurs de b obtenues par la méthode de Patton et Schumm (1975) dans la présente étude se situent entre -0,19 pour la Famenne et -0,38 pour la Région Limoneuse et la Région Jurassique (Tableau 6). Ceci est donc compatible avec les considérations théoriques de Patton et Schumm (1975). La valeur de b pour la Famenne est en dessous des gammes de valeurs renseignées par Vandaele et al. (1996). Cependant, d'autres études ont également rapporté des valeurs de $b > -0,3$ (Tableau 6) comme Boardman et al. (1992) qui rapportent une valeur relativement faible pour la région du South Downs en Angleterre. (-0,25). Les valeurs du paramètre a obtenues pour des contextes méditerranéens dans l'étude de Vandekerckhove et al. (2000) sont plus élevées que celles obtenues dans notre étude. Cependant, la gamme des valeurs de b est similaire. Les paramètres a et b rapportés par Vanwallegheem et al. (2005) pour le centre de la Belgique sont similaires aux paramètres obtenus pour la Région Limoneuse et la Famenne.

Même si la gamme des valeurs de a et b apparaît relativement cohérente entre la présente étude et des études antérieures, il existe une grande variabilité qui semble refléter de grandes différences dans les conditions environnementales qui ont mené au ravinement. Il est cependant très difficile d'interpréter les paramètres en termes de processus tel que suggéré par Vandaele et al. (1996). Une telle interprétation nécessite en effet que l'un des deux paramètres de seuil reste constant. Dans la pratique, les deux paramètres varient d'un jeu de données à l'autre et les seuils topographiques se recoupent même parfois, ce qui signifie que les conditions d'initiation du ravinement ne présente pas de corrélation fixe avec l'aire contributive. Enfin, les valeurs des paramètres dépendent fortement de la méthode de seuillage (Tableau 6) et de la taille du jeu de données (Figure 8). Pour une comparaison fiable entre les études, une même méthode de seuillage devrait être appliquée.

Tableau 7: Paramètres a et b des seuils topographiques (Equation 1) pour l'initiation des ravines repris dans diverses études. Les paramètres ont été obtenus par la méthode de Patton et Schumm (1975) (PS) ou la méthode de régression orthogonale (OR, Vandekerckhove et al., 1998 ou Vanwalleghe et al., 2005).

Reference	a	b	Méthode de seuillage	Méthode d'observation	Région
Vandaele et al. (1995) ¹	0.025	-0.40 to -0.35	PS	Photos aériennes	Belgique centrale
Poesen et al. (1995) ¹	0.080	-0.40 to -0.30	PS	Mesures de terrain	Belgique centrale
Govers (1991) ¹	0.004	-0.400	PS	Mesures de terrain	Belgique centrale
IGN (1983) ¹	0.060	-0.400	PS	Photos aériennes	France
Boardman (1992) ¹	0.090	-0.250	PS	Mesures de terrain	UK-South Downs
Vandaele et al. (1995) ¹	0.020	-0.350	PS	Photos aériennes	Portugal
	0.157	-0.133		Mesures de terrain	Sud-est de l'Espagne
	0.146	-0.142		Mesures de terrain	Sud-est de l'Espagne
	0.227	-0.104		Mesures de terrain	Sud-est de l'Espagne
Vandekerckhove et al. (2000)	0.101	-0.267	OR	Mesures de terrain	Sud-ouest de l'Espagne
	0.102	0.226		Mesures de terrain	Nord du Portugal
	0.083	0.303		Mesures de terrain	Sud du Portugal
	0.077	0.414		Mesures de terrain	Sud du Portugal
	0.285	0.139		Mesures de terrain	Grèce
Vanwalleghe et al. (2005)	0.020	0.141	OR	Mesures de terrain	Belgique centrale

¹ dans Vandaele et al. (1996)

4. Stabilité du seuil topographique dans le temps

Quarante-neuf, 51 et 25 ravines étaient disponibles pour tracer les seuils topographiques dans la zone #4 (Figure 1) pour respectivement 1999 (PPNC), 2006-2007 et 2009-2010. Comme précédemment, le quantile le plus extrême utilisé est le quantile qui a permis d'estimer les paramètres a et b avec une précision acceptable. Les quantiles 0,07, 0,06 et 0,13 ont été utilisés respectivement pour 1999 (PPNC), 2006-2007 et 2009-2010 (Figure 10). Les seuils topographiques correspondants sont présentés dans la Figure 11.

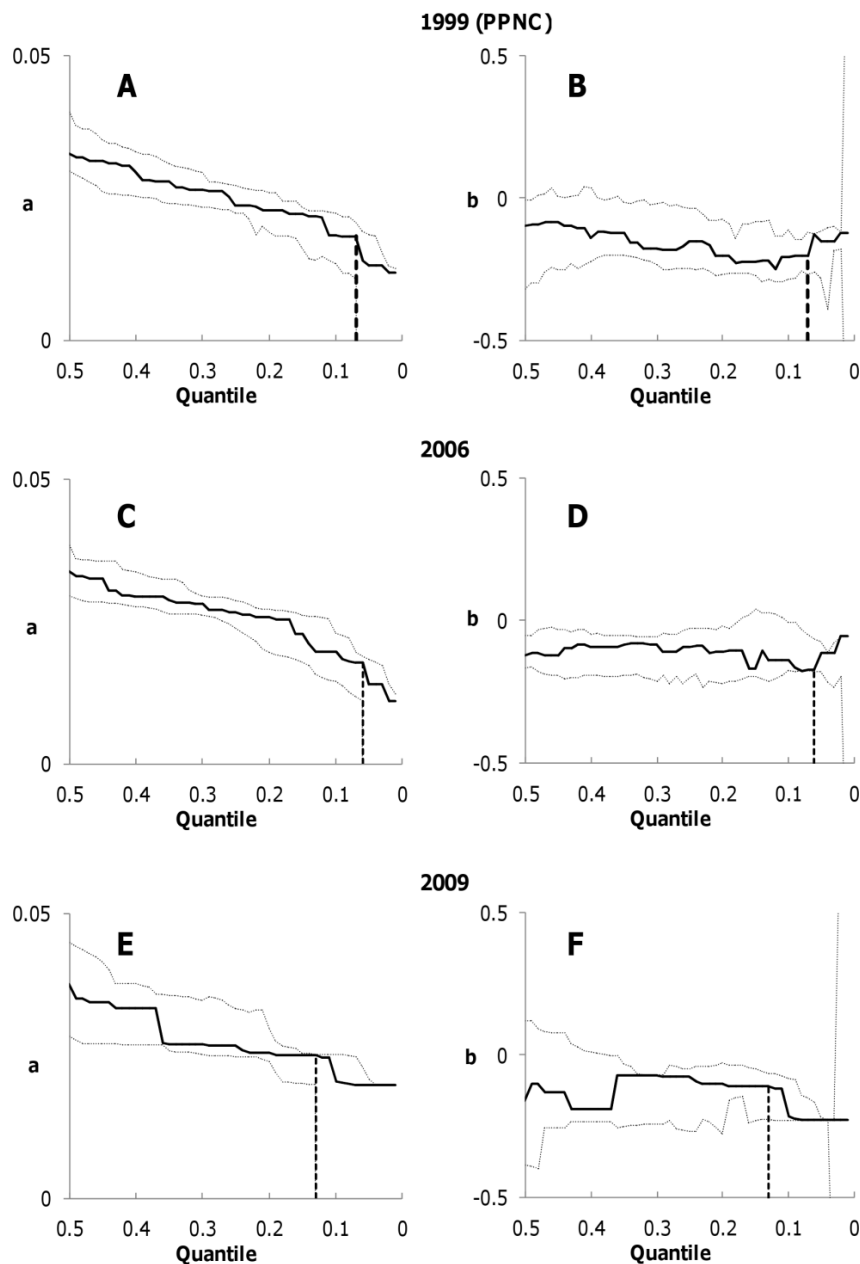


Figure 10: Estimations des paramètres a et b du seuil topographique (Equation 1) en utilisant la régression quantile pour des quantiles compris entre 0,01 et 0,5 (traits pleins) pour le site d'étude #4 (Figure 1) pour 1999 (A et B), 2006 (C et D) et 2009 (E et F). Les lignes grises représentent les intervalles de confiance à 90%. Les lignes verticales en pointillés marquent le quantile le plus extrême pour lesquels les intervalles de confiance des deux paramètres de la régression peuvent être estimés avec une précision acceptable.

Les facteurs topographiques et les conditions du sol étant constants dans une région donnée, les différences de seuil topographique devraient refléter des différences aux niveaux des facteurs variables d'une année à l'autre comme l'occupation du sol ou le climat. Les valeurs du paramètre b pour les trois années sont similaires. La Figure 12 montre que les intervalles de confiance à 90% se chevauchent. Ceci est également vrai pour le coefficient a de 1999 (PPNC) et 2009-2010. Par contre, il n'y a tout juste pas de chevauchement pour le coefficient a en 2006-2007 et 2009-2010. Cela peut être dû à la différence marquée dans le nombre de ravines entre les deux ensembles de données qui a un impact sur le quantile utilisé pour la régression (Figure 8).

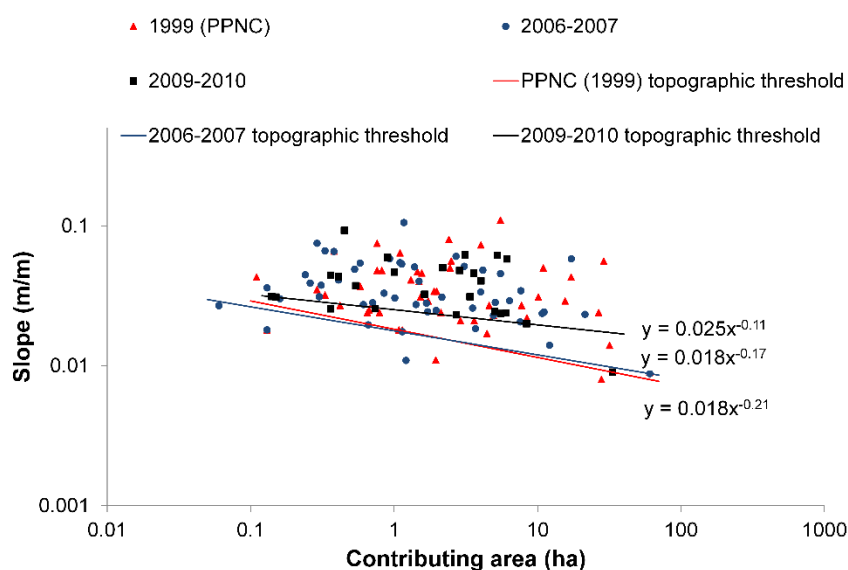


Figure 11: Seuils topographiques déterminés par la méthode de régression quantile pour le site d'étude #4 (Figure 1) pour trois années différentes. Quantile $\alpha = 0,07$ pour 1999 (PPNC), 0,06 pour la période 2006-2007 et 0,13 pour la période 2009-2010).

Lorsqu'on se situe au-dessus du seuil topographique, la probabilité d'observer une ravine pour un contexte topographique donné est conditionnée par une combinaison d'occupation du sol et de climat pouvant provoquer un volume de ruissellement suffisant pour l'initiation de la ravine. Ceci explique la variabilité du nombre ravine observé d'une année à l'autre et pourquoi les ravines ne se forment pas systématiquement au même endroit d'une année à l'autre.

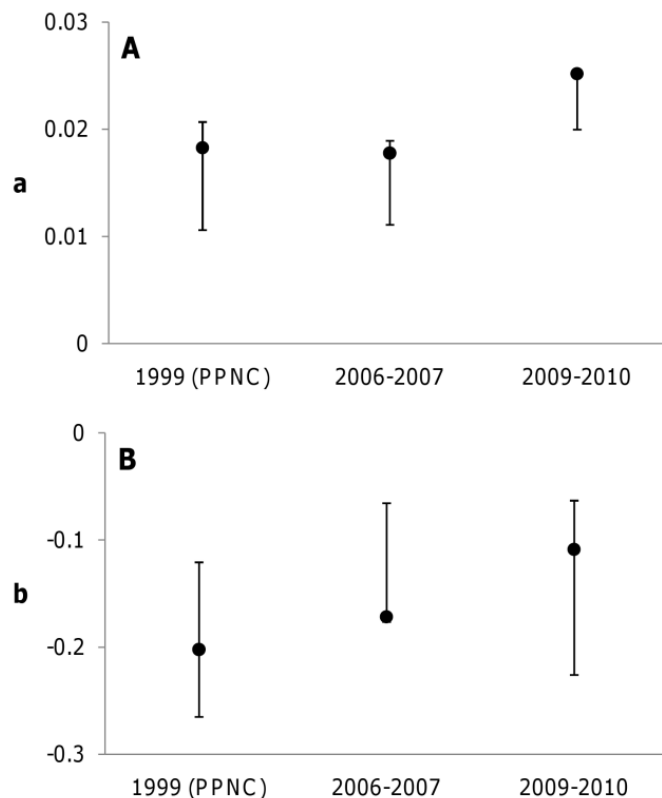


Figure 12: Comparaison des valeurs des paramètres (A) α (ordonnée à l'origine) et (B) β (pente) du seuil topographique (Equation 1) pour le site d'étude #4 (Figure 1). Ces valeurs correspondent au quantile le plus extrême pour lequel les intervalles de confiance à 90% sur les paramètres sont estimés acceptables. Les barres verticales correspondent aux intervalles de confiance à 90% calculés avec la méthode du test de score de rang.

5. Conclusions

Parmi les méthodes de seuillage, la régression quantile semble être la plus appropriée pour définir le seuil topographique. Elle est robuste (peu sensible aux valeurs extrêmes) et le seuil reflète le comportement moyen des points à l'extrémité du nuage de point et non pas le comportement moyen de l'ensemble des points. La régression quantile a été appliquée avec succès pour mettre en évidence les différences régionales au niveau des contextes topographiques favorables à l'initiation des ravines. Les seuils topographiques résultant semblent stables dans le temps et ne sont donc pas affectés par des changements d'occupation du sol ou de climat. Cependant, le seuil topographique défini par la méthode de la régression quantile est sensible au nombre de données et peut introduire un biais dans l'interprétation des résultats lorsque de petits ensembles de données sont comparés. Par conséquent, de suffisamment grands ensembles de données doivent être utilisés autant que possible. La régression quantile doit être recommandée comme méthode de référence pour l'établissement des seuils topographiques car elle repose sur des bases statistiques et est robuste aux valeurs extrêmes.

Evaluation de l'incertitude sur les caractéristiques des ravines et le seuil topographique liée à l'utilisation de photographies aériennes

Le recours à des photographies aériennes pour la constitution de bases de données de ravines présente l'avantage de pouvoir couvrir de vastes étendues. De plus, l'existence de différents jeux de données à l'échelle de la Wallonie permet de mener des analyses à travers le temps. A ce jour, il n'existe pas de procédure standardisée de détection automatique des ravines et les tentatives présentées dans la littérature sont peu concluantes. Par conséquent, la digitalisation est principalement manuelle et comporte une part de subjectivité qui peut potentiellement, selon l'opérateur, mener à des résultats différents en termes de nombre ou de longueur de ravines ainsi qu'en termes de seuil topographique. En effet, quelle que soit l'application, il a été bien documenté qu'une certaine subjectivité est inévitable lorsque des décisions humaines sont prises au cours de processus d'analyse d'images (par exemple, Legros et al., 1996; Philipson, 1997 dans Thierry et Lowell, 2001; Pasquallini et al., 2001; Leckie et al., 2003; Powell et al., 2004; Baveye et al., 2010; Zhou et al., 2010). Tout travail manuel de photo-interprétation doit donc intégrer une évaluation de l'impact potentiel de cette subjectivité sur la qualité des données.

Outre l'identification des ravines en soi, la subjectivité de l'opérateur peut également affecter leur délimitation, qui à son tour peut affecter d'autres caractéristiques telles que la longueur estimée de la ravine par exemple. La classification des ravines peut également dépendre de l'opérateur car cela repose sur l'interprétation des facteurs qui ont déclenché la formation des ravines observées. On s'attend également à ce que la subjectivité de l'opérateur ait une incidence sur le seuil topographique. Puisque le seuil topographique est basé sur les valeurs d'aire contributive et de pente au point d'incision, le seuil topographique dépendra de la précision avec laquelle l'opérateur peut localiser les points d'incision sur les photographies aériennes. Ces derniers sont parfois difficiles à identifier de façon claire (par exemple, des ravines formées à partir d'un ou de plusieurs petits axes de concentration) ce qui induit *de facto* une décision subjective de l'endroit où commence la ravine. Enfin, les ravines d'origine anthropiques doivent être exclues lorsque l'on définit le seuil topographique car elles ne résultent pas seulement de facteurs topographiques. En conséquence, toute erreur de classification peut entraîner le rejet ou, au contraire, l'inclusion de certaines ravines, et donc affecter la définition du seuil topographique.

Les objectifs de cette section sont donc (i) d'évaluer dans quelle mesure la caractérisation du ravinement (nombre, somme, longueur totale, l'emplacement du point d'incision, classification) dépend de l'opérateur qui interprète les photographies aériennes, et (ii) d'en évaluer l'impact sur seuil topographique.

1. Matériel et méthodes

La base de données de ravine # 3 (Tableau 1) a été utilisée. Elle résulte de la digitalisation et de la classification des ravines par 11 opérateurs de niveau master ou doctorat qui participent activement à des projets traitant de l'érosion du sol sur les terres agricoles. Les photographies aériennes couleur utilisées ont été prises en 2006 à 5800 m de hauteur et ont été orthorectifiées. La résolution d'un pixel est de 0,5 m. Sur base de l'étude de Vanwalleghem et al. (2005) ayant caractérisé 123 ravines en Région Limoneuse flamande, cette résolution doit être suffisante pour permettre la détection de la plupart des ravines d'été, à la fois profondes ($> 0,8$ m de profondeur; largeur moyenne au point d'incision = 0,9 m) et peu profondes ($< 0,8$ m de profondeur; largeur au point d'incision = 2,2 m), ainsi que des ravines profondes d'hiver (largeur au point d'incision = 2,8 m en moyenne). Avec une largeur moyenne de 0,52 m au point d'incision, les ravines peu profondes d'hiver peuvent être sous-estimées.

1.1. Identification et digitalisation des ravines

Afin d'évaluer l'impact de la subjectivité de l'opérateur sur l'identification des ravines, une méthodologie a été définie et expliquée aux opérateurs. Trois sources d'information ont été fournies dans un logiciel de SIG: des photographies aériennes, les cartes topographiques avec courbes de niveau (échelle 1: 10 000) de l'Institut Géographique National (IGN) et une carte qui met en évidence les axes de concentration du ruissellement avec des aires contributives > 1 ha, dérivés du MNT 10 m. Toutes les terres qui n'étaient pas cultivées (prairies, forêt..) ont été cachées par un masque. L'échelle recommandée pour l'affichage était de 1: 2500, mais les opérateurs étaient autorisés à changer d'échelle pour identifier et délimiter les ravines.

Un arbre de décision fourni aux opérateurs (Annexe 1) a été formulé de manière à permettre à l'utilisateur de discriminer les ravines des autres éléments linéaires qui pourraient être pris pour des ravines. Ceux-ci ont été illustrés par une ou plusieurs photos selon les cas. Les opérateurs devaient chercher des objets linéaires continus contrastant avec l'environnement proche, par exemple des zones de sol nu ou des repousses dans des champs cultivés avec des cultures d'hiver ou de printemps.

Quelle que soit la forme de l'objet, s'il y avait présence d'un cône de dépôt à l'extrémité aval, il devait être considéré comme une ravine et l'opérateur devait le digitaliser (Figure 13a). Si l'objet avait une forme sinueuse sur au moins une partie de sa longueur totale et si aucun dépôt n'était observé à l'extrémité aval, l'opérateur devait s'assurer qu'il ne s'agissait pas d'un ancien sentier ou d'une route renseignée par la carte IGN. Si pas, l'objet devait être considéré comme une ravine et devait être digitalisé. Si l'objet était droit sur toute sa longueur et sans dépôt à l'extrémité aval, l'opérateur devait vérifier deux cas. Il fallait d'abord vérifier si l'objet coïncidait avec une bordure de champ ou s'il était orienté perpendiculairement à la direction principale du travail du sol. Si oui, l'objet correspondait probablement à une zone de dépôt formée à l'extrémité des sillons ou à une raie de labour (Figure 13b), et ne devait pas être digitalisé. Il fallait ensuite vérifier, si l'objet avait une largeur constante et s'il se présentait de manière récurrente avec un espacement à peu près constant. Si oui, il est fort probable que l'objet

GISER – Caractérisation et prédiction du ravinement – Evaluation de l'incertitude sur les caractéristiques des ravines et le seuil topographique liée à l'utilisation de photographies aériennes

correspondait à des traces de roues, des sillons, des motifs causés par des tuyaux de drainage ou un couvert végétal hétérogène en raison d'un problème avec la machine lors du semis (Figure 13c). Dans ces cas, l'objet ne devait pas être digitalisé. Dans tous les autres cas, c'est-à-dire des objets isolés sans cône de dépôt apparent, l'opérateur était tenu de digitaliser l'objet. Celui-ci correspondait probablement à une ravine formée dans une trace de roue, à un bord de champ ou d'un talus.

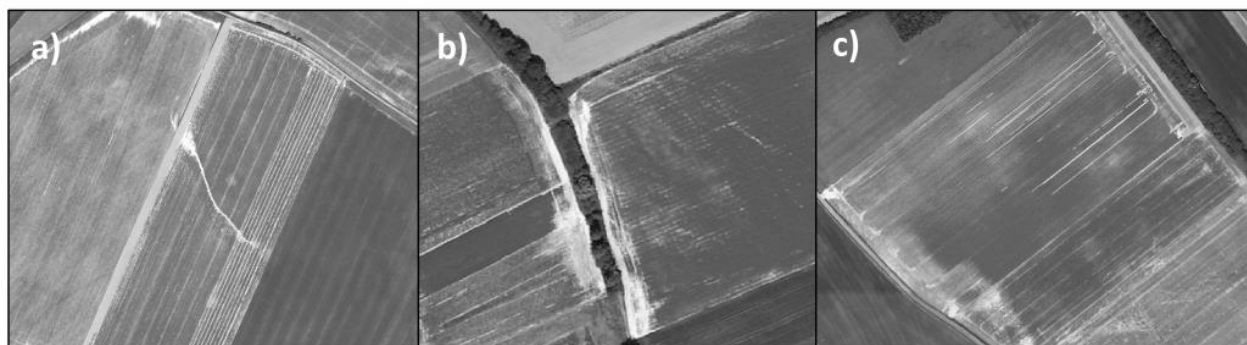


Figure 13: (a) Ravine présentant un cône de dépôt à l'aval; (b) dépôts à l'extrémité de sillons contre un talus en bord de parcelle; (c) objets linéaires récurrents avec un espacement constant, correspondant probablement à des traces de roues ou causés par un problème de machine lors du semis.

Il était demandé aux opérateurs de délimiter la ravine depuis le point d'incision jusqu'au point final. Lorsque le point d'incision était situé dans une zone d'érosion diffuse, il devait être situé au centre de gravité de cette zone. De même, lorsque la fin de la ravine correspondait à une grande zone de dépôt, les opérateurs devaient la situer au centre de gravité du cône de dépôt. Les ravines discontinues devaient être digitalisées comme des ravines différentes. Les ravines devaient ensuite être classées en suivant une clé dichotomique de classification (Annexe 2). Les opérateurs n'avaient pas de temps limite pour effectuer ce travail et aucune assistance supplémentaire n'a été fournie après la phase initiale d'explication.

1.2. Caractéristiques des ravines éphémères et seuils topographiques

Le nombre total de ravines, la longueur totale des ravines, l'emplacement des points d'incision et la classification des ravines ont été comparés entre les opérateurs. Pour comparer les emplacements des points d'incision, des distances standard ont été définies à l'aide du logiciel ArcGIS pour les ravines identifiées par plus d'un opérateur. Pour une ravine donnée, la distance standard correspond à la distance moyenne entre les points d'incision identifiés par chaque opérateur et le centre de gravité des points d'incision de tous les opérateurs.

Afin de tenter d'expliquer pourquoi certains objets étaient plus ou moins facilement identifiés par les opérateurs, des analyses de la variance ont été réalisées pour déterminer l'impact de la forme de l'objet (longueur et sinuosité), du nombre de parcelles traversées par la ravine, et des types de cultures le long de la ravine. La sinuosité est calculée comme le rapport entre la longueur réelle de l'objet et la longueur la plus courte entre ses deux extrémités. Il est à noter qu'il n'était pas possible d'estimer la largeur des objets digitalisés car il s'agissait de lignes.

Pour les 11 opérateurs, seules les ravines classées comme ravines de type 1 dont l'aire contributive était dépourvue de routes ont été utilisées pour la détermination du seuil topographique. Les ravines de type 2 et de type 3 ont été exclues pour les raisons expliquées dans la section relative à l'analyse du seuil topographique. Les seuils topographiques ont été définis suivant la méthodologie décrite dans la section précédente. Quatre méthodes de seuillage ont été comparées: Patton and Schumm (1975) nommée PS75, Vanwalleghe et al. (2005) nommée VW05, Vandekerckhove et al. (1998) nommée VDK98 et la régression quantile nommée QR. Les quatre méthodes de seuillage ont été appliquées à chacun des jeux de données des 11 opérateurs ainsi qu'à un jeu de données composé de toutes les ravines de type 1 dépourvues de route et identifiées par au moins 6 opérateurs.

2. Résultats

2.1. Caractéristiques et classification des ravines

Dans la zone analysée, les 11 opérateurs ont identifié entre 52 et 139 ravines. La moyenne se situe à 99 ± 21 (moyenne \pm écart type; Figure 14). Au total, 259 ravines éphémères différentes ont été numérisées et la plupart ont été classées en type 1. Tous les opérateurs ont identifié au moins quelques ravines de type 2, alors que tous les opérateurs n'ont pas identifiés de ravines de type 3 (Figure 14). Parmi les 259 ravines digitalisées, 103 (40%) ont été numérisées par un seul opérateur et 37 (14%) sont partagées par deux opérateurs seulement (Tableau 8). Quarante-huit ravines (35%) ont été identifiées par au moins 6 opérateurs, c'est-à-dire par plus de la moitié des opérateurs. Seulement 18 (7%) ravines ont été identifiées par l'ensemble des 11 opérateurs.

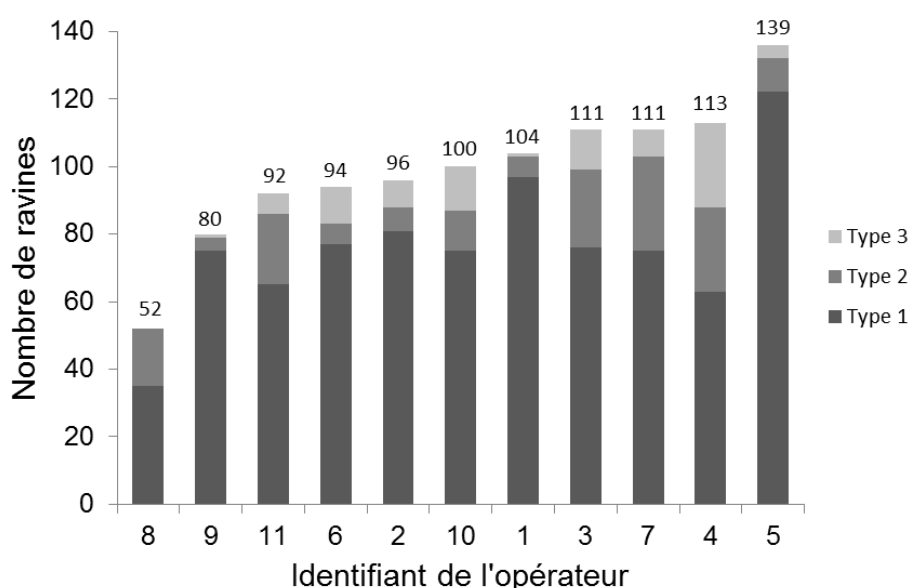


Figure 14: Nombre de ravines identifiées par chacun des 11 opérateurs selon le type de ravine

La longueur totale de ravines (somme des longueurs de toutes les ravines) varie également fortement selon les opérateurs (Figure 15). La longueur totale moyenne était de $15\,546 \pm 3710$ m (min : 8865 et max : 23724 m). Les opérateurs ayant la plus grande longueur totale de ravines (opérateurs 1, 2 et 9) ne sont pas ceux qui ont digitalisé le plus grand nombre de ravines. Par conséquent, ils ont digitalisé en moyenne des éléments plus longs.

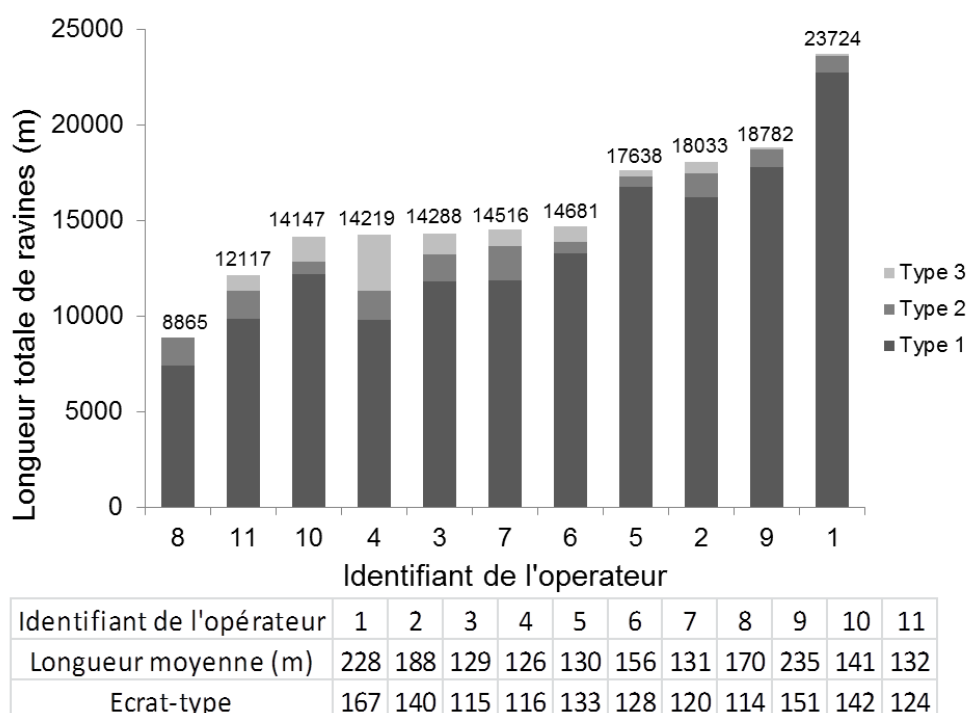


Figure 15: Longueur totale de ravines en fonction de l'opérateur et du type de ravine. Le tableau reprend la longueur moyenne de ravine et l'écart-type selon l'opérateur.

Un type unique de ravine a été attribué à chacune des 259 ravines (Tableau 8). Quand une ravine donnée était classée différemment par les différents opérateurs, il a été décidé de la classer selon le type dominant. S'il n'y avait pas de type dominant unique, c'est-à-dire quand une ravine était classée de manière égale par les opérateurs selon deux types différents, le type attribué était un type mixte (par exemple, [1 ou 2], [1 ou 3]). Septante et un pourcent des ravines digitalisées ont été principalement classées comme étant de type 1, 13% de type 2 et 10% de type 3. Les 6% restants n'ont pu être associés à un type de ravine dominant. La majorité des ravines de types 2 et 3, respectivement 58% et 64%, a été digitalisée par un seul opérateur. Pas une seule ravine de type 3 n'a été identifiée par plus de 3 opérateurs. Ceci contraste avec les ravines de type 1 puisque 41% ont été digitalisées par au moins 6 opérateurs. Cependant, 36% des ravines de type 1 ont également été digitalisées par un seul opérateur. Le Tableau 9 montre la distribution des objets dont le type dominant était le type 1 et qui ont été digitalisés par au moins 6 opérateurs. Ces 'objets' ont donc une forte probabilité d'être des ravines. D'une manière générale, plus le nombre d'opérateurs qui ont identifié un objet donné est important, plus les opérateurs sont en accord sur sa classification. En moyenne, les opérateurs sont en accord sur la classification de 87% des ravines de type 1 bien qu'elles aient été identifiées comme de type 2 (9%) ou de type 3 (4%) par certains opérateurs.

Tableau 8: Répartition des 259 ravines digitalisées selon le nombre d'opérateurs et le type dominant attribué. [1]: ravines situées sur un axe de concentration du ruissellement bien défini (type 1), [2]: ravines situés sur des versants sans axe de concentration du ruissellement apparent (type 2), [3]: ravines dont l'initiation résulte d'éléments linéaires (type 3), [1 ou 2], [2 ou 3], [1 ou 3]: ravines qui ont été classées de manière équivalente par les opérateurs dans deux classes différentes (voir texte).

Nombre d'opérateurs ayant identifié la même ravine	Type de ravine						Somme	Pourcentage
	[1]	[2]	[3]	[1 or 2]	[2 or 3]	[1 or 3]		
11	24	1	-	-	-	-	25	10
10	16	-	-	2	-	-	18	7
9	9	3	-	-	-	-	12	5
8	11	-	-	1	-	-	12	5
7	11	3	-	-	1	-	15	6
6	4	2	-	-	-	-	6	2
5	5	-	-	-	-	-	5	2
4	8	-	-	-	1	-	9	3
3	11	4	2	-	-	-	17	7
2	18	2	7	7	1	2	37	14
1	66	21	16	-	-	-	103	40
Somme	183	36	25	10	3	2	259	100
Pourcentage	71	13	10	4	1	1	100	-

Tableau 9: Répartition des ravines classées majoritairement en Type1 selon le nombre d'opérateur et les 3 types de ravines. Cette distribution reflète le classement de chaque ravine par chaque opérateur. Seules les ravines digitalisées par au moins six opérateurs sont considérées.

Nombre d'opérateurs ayant identifié la même ravine	Nombre de ravines	Classification de la ravine (pourcentage des opérateurs; moyenne \pm écart-type)		
		Type 1	Type 2	Type 3
11	24	94 (± 10)	3 (± 8)	3 (± 7)
10	16	91 (± 12)	5 (± 9)	4 (± 10)
9	9	90 (± 17)	7 (± 10)	3 (± 7)
8	11	88 (± 15)	8 (± 11)	4 (± 6)
7	11	82 (± 14)	10 (± 14)	8 (± 11)
6	4	79 (± 14)	21 (± 14)	0
Moyenne		87 (± 5)	9 (± 6)	4 (± 2)

Les analyses de la variance ont montré que la longueur de l'objet, le nombre de parcelles traversées et le type de culture ont un effet significatif sur le nombre d'opérateurs qui ont identifié un objet. Les objets identifiés par 11 opérateurs étaient significativement plus longs que ceux identifiés par 1, 2 ou 3 opérateurs ($0,005 < p < 0,030$). La longueur moyenne des objets identifiés par 11 opérateurs était de 235 m (± 128 m). Quand un objet était identifié par 1, 2 ou 3 opérateurs les longueurs moyennes étaient respectivement de 129 m (± 146 m), 127 m (± 88 m) et 84 m (± 105 m). Les objets identifiés par 11 opérateurs ont traversé un nombre beaucoup plus grand de parcelles que ceux identifiés par 1, 2 ou 3 opérateurs ($6 \times 10^{-6} < p < 0,016$). De même, les objets identifiés par 10 opérateurs ont également traversé un nombre significativement plus important de parcelles que ceux identifiés par 1 ou 2 opérateurs ($0,011 < p < 0,016$). Le nombre moyen de parcelles traversées par un objet digitalisé par 11 et 10 opérateurs était de 2,2 ($\pm 1,2$) et 2,0 ($\pm 1,2$), respectivement. Quand un objet a été identifié par 1, 2 ou 3 opérateurs, le nombre moyen de parcelles traversées était respectivement de 1,3 ($\pm 0,6$), 1,2 ($\pm 0,5$) et 1,4 ($\pm 0,6$). Quand un objet était situé dans un champ de betteraves, le nombre d'opérateurs l'ayant identifié était en moyenne significativement plus élevé ($8,8 \pm 2,8$) que s'il se trouvait dans un champ de céréales d'hiver, de pomme de terre ou de maïs (respectivement $p = 1,2 \times 10^{-5}$, $p = 0,053$, $p = 2,2 \times 10^{-16}$). Il n'y a pas de différences significatives selon que l'objet était localisé dans un champ de pomme de terre ou de maïs (respectivement $7,7 \pm 3,6$ et $7,6 \pm 3,6$). Toutefois, le nombre d'opérateurs est significativement plus faible lorsque l'objet se trouvait dans un champ de céréales d'hiver par rapport aux champs de maïs et de pomme de terre ($6,3 \pm 3,8$; $3,3 \times 10^{-6} < p < 0,031$). La sinuosité de l'objet n'a aucun effet significatif sur le nombre d'opérateurs l'ayant identifié.

2.2. Localisation des points d'incision des ravines

Pour l'analyse de l'emplacement des points d'incision des ravines, seuls les objets digitalisés par plus de la moitié des opérateurs (≥ 6) ont été retenus car ils présentaient une grande probabilité d'être de véritables ravines. En conséquence, seules 88 ravines ont été retenues. Près de la moitié de ces ravines ont été digitalisées par 11 ou 10 opérateurs, et 85% ont été classées comme étant de type 1 (Tableau 8). La distance standard moyenne des emplacements des points d'incision était de $14,8 \pm 18,9$ m. La Figure 16 montre que la distance standard entre les points d'incision (16,3 m) est plus importante pour les ravines de Type 1. Les ravines de Type 2 présentent quant à elles la distance la plus courte norme (5,6 m). Le nombre d'opérateurs ayant identifié une même ravine a également un effet sur la distance standard moyenne (Figure 17). Cela n'est représenté que pour les ravines de Type 1, compte tenu du faible nombre de ravines de Type 2 et de ravines mixtes (Tableau 8). La Figure 17 montre que la distance standard est la plus faible (entre 13 m et 6 m) lorsque seulement 6 ou 7 opérateurs ont identifié la même ravine. Pour les ravines identifiées par 8 à 11 opérateurs, la distance standard est relativement stable et se situe à 18 m en moyenne.

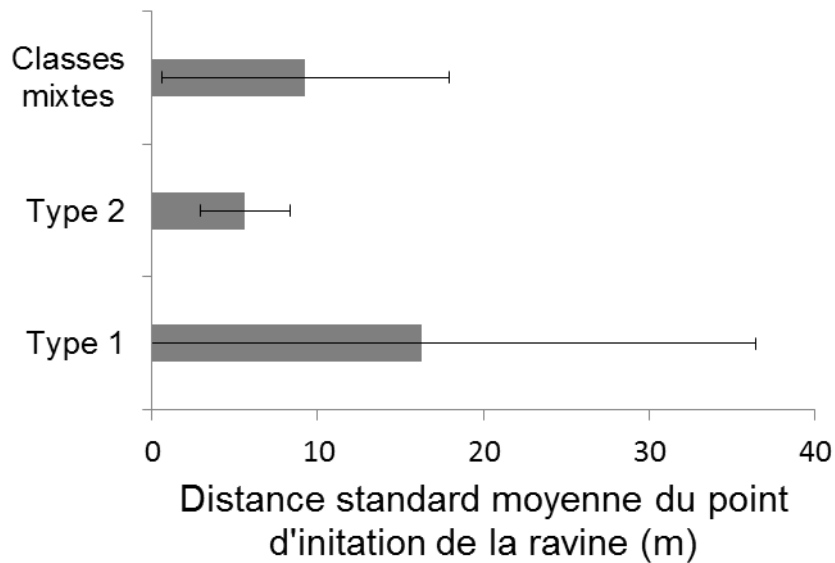


Figure 16: Distance standard moyenne des emplacements des points d'incision des ravines en fonction du type de ravine pour des ravines identifiées par au moins six opérateurs.

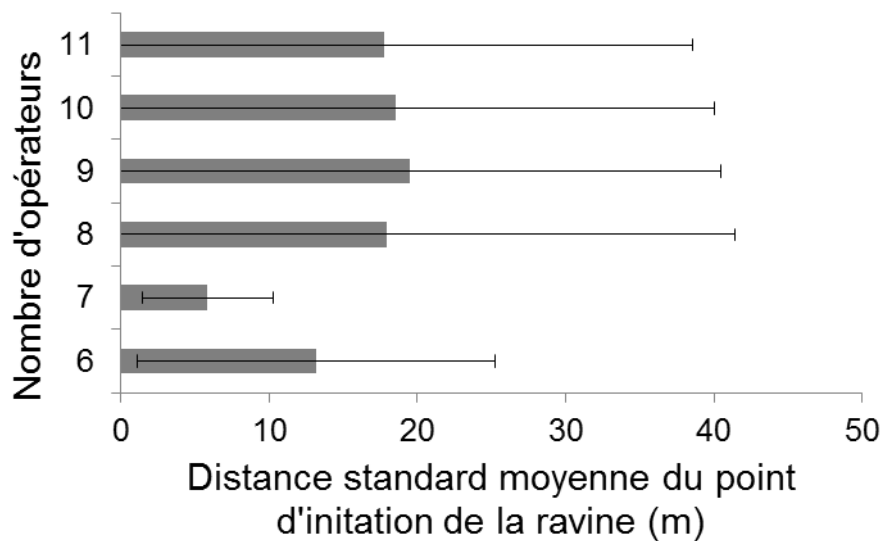


Figure17: Distance standard moyenne des emplacements des points d'incision des ravines en fonction du nombre d'opérateurs les ayant identifiées.

2.3. Analyse du seuil topographique

Après avoir enlevé des 11 jeux de données les ravines dont l'aire contributive était traversée par une route, le nombre moyen de ravine de Type 1 qui pouvait être utilisé pour définir le seuil topographique était de 59 ± 16 (min: 28 et max : 94). La Figure 18 montre que parmi les seuils topographiques, celui qui résulte de la méthode PS75 est le plus sensible aux différences entre les opérateurs. Ceci est confirmé par le calcul de l'écart-type des coefficients a et b

(Equation 1) du seuil, qui sont environ deux fois plus grands que pour les trois autres méthodes (Tableau 10). La moyenne et l'écart type des valeurs de b obtenues par les méthodes VW05, VDK98 et QR sont très similaires. Les différences sont plus marquées en ce qui concerne la valeur du coefficient a . La valeur obtenue avec la méthode VW05 est deux fois plus faible que pour la méthode QR en moyenne, tandis que la méthode VDK98 conduit à des valeurs intermédiaires. Les méthodes QR et VDK98 présentent les plus faibles coefficients de variation du coefficient a .

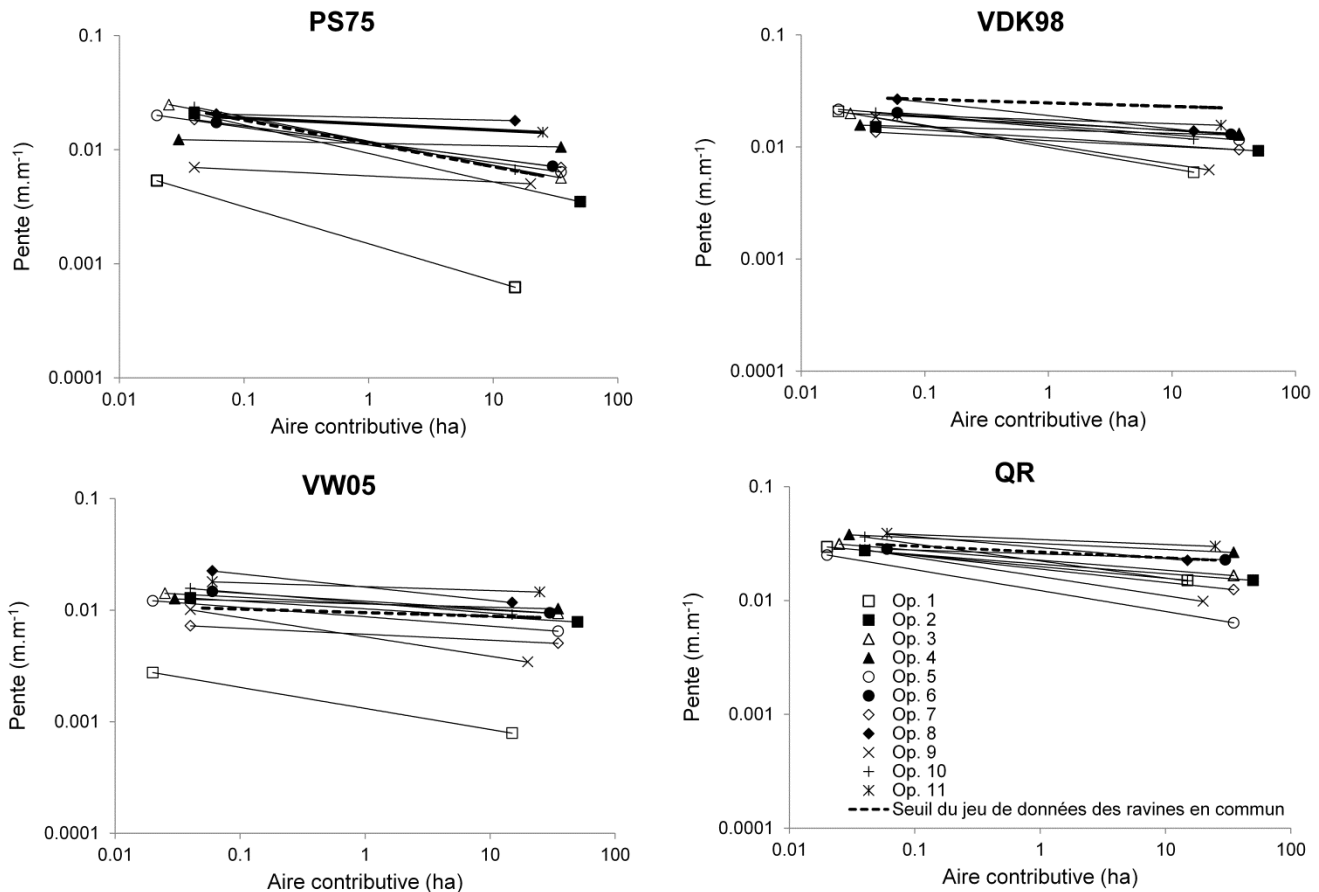


Figure 18: Seuils topographiques pour l'initiation des ravines calculés pour chacun des opérateurs selon les quatre méthodes de seuillage. Les lignes en pointillés et en gras représentent les seuils calculés à partir du jeu de données composé des ravines identifiées par au moins six opérateurs.

Les quantiles qui ont été utilisées pour calculer le seuil topographique via la méthode QR sont anormalement élevés pour les opérateurs 4 et 11 (0,42 et 0,50) (Tableau 10 et Figure 19). Lorsque l'on exclut du calcul de la moyenne des coefficients a et b les opérateurs 4 et 11, les tendances observées restent cependant les mêmes. Toutefois, la position moyenne du seuil (coefficient a) défini par la méthode QR est abaissée et l'écart-type diminue. Le quantile moyen utilisé pour la méthode QR est de $0,21 \pm 0,13$, et $0,16 \pm 0,05$ après exclusion des opérateurs 4 et 11. Aucune différence significative entre les méthodes de seuillage pour la valeur de b n'a été observée après l'exclusion des opérateurs 4 et 11 ($p = 0,115$). Cependant, une différence significative pour la valeur moyenne du coefficient a existe entre les méthodes VW05 et QR ($p = 0,007$).

Tableau 10: Valeurs des coefficients a et le b du seuil topographiques (Equation 1) pour chacun des 11 jeux de données et selon les quatre méthodes de seuillage. Seules les ravines de Type 1 dont les aires contributives ne sont pas traversées par une route sont prises en compte. Les quantiles α utilisés pour la méthode de la régression quantile sont également indiqués. Le jeu de données composé a été défini à partir de l'ensemble des ravines de Type 1 identifiées par au moins six opérateurs et dont l'aire contributive est dépourvue de route.

Identifiant de l'opérateur	PS75		VW05		VDK98		QR		
	a	b	a	b	a	b	a	b	α
1	0.002	0.33	0.001	0.19	0.010	0.19	0.020	0.10	0.21
2	0.009	0.25	0.010	0.07	0.012	0.07	0.021	0.08	0.22
3	0.012	0.20	0.011	0.06	0.016	0.06	0.023	0.09	0.16
4	0.040	0.02	0.011	0.03	0.014	0.03	0.032	0.05	0.42
5	0.040	0.15	0.009	0.08	0.016	0.08	0.012	0.18	0.04
6	0.012	0.14	0.012	0.07	0.016	0.07	0.026	0.03	0.17
7	0.012	0.14	0.006	0.05	0.011	0.05	0.019	0.12	0.12
8	0.019	0.02	0.016	0.12	0.019	0.12	0.029	0.10	0.20
9	0.006	0.05	0.006	0.17	0.010	0.17	0.016	0.17	0.14
10	0.012	0.21	0.012	0.09	0.015	0.09	0.022	0.15	0.15
11	0.017	0.05	0.016	0.04	0.017	0.04	0.034	0.04	0.50
Jeu de données composé	0.011	0.20	0.009	0.03	0.033	0.03	0.027	0.05	0.23
Moyenne ^b	0.016	0.14	0.010	0.09	0.014	0.09	0.023	0.10	
Ecart-type	0.012	0.10	0.004	0.05	0.003	0.05	0.006	0.05	
Moyenne ^c	0.014	0.17	0.009	0.10	0.014	0.10	0.021	0.11	
Ecart-Type	0.010	0.09	0.004	0.05	0.003	0.05	0.005	0.04	

^a PS75 : Patton et Schumm (1975); VW05 : Vanwalleghe et al. (2005) ; VDK98 : Vandekerckhove et al. (1998); QR : Régression Quantile.

^b Tous les opérateurs

^c Sans les opérateurs 4 and 11

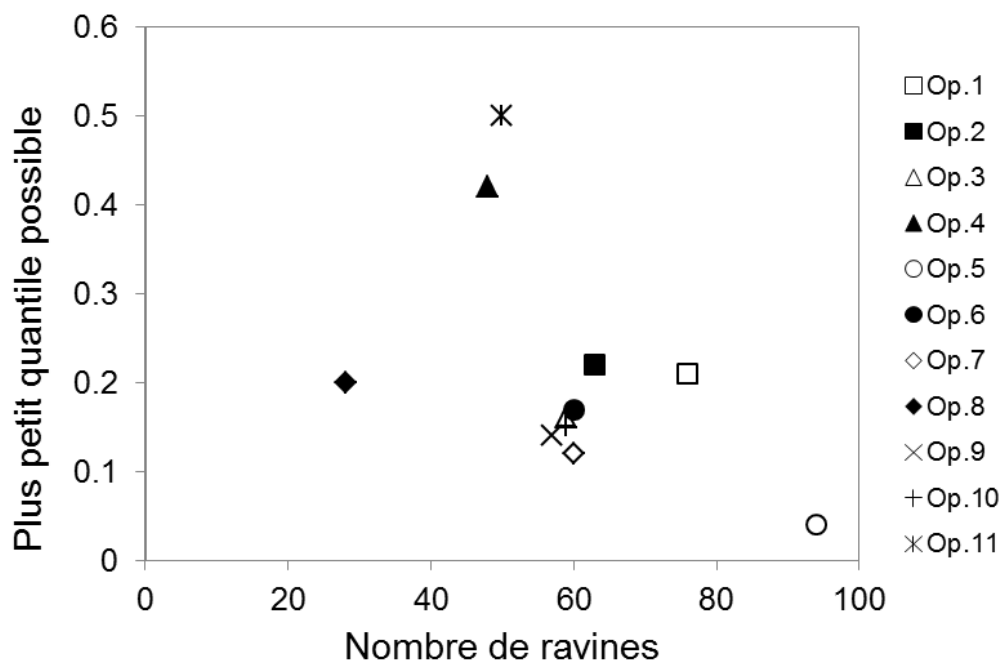


Figure 19: Relation entre le nombre de ravines dans un jeu de données et le quantile utilisé pour définir le seuil topographique par régression quantile. Chaque point correspond à un opérateur.

La Figure 20 montre la valeur de la pente et des aires contributives aux points d'incision de l'ensemble des ravines de Type 1 (183 ; Tableau 8). Pour une ravine donnée, la position moyenne du point d'incision est définie comme le centre de gravité des points d'incision identifiés par chaque opérateur. La dispersion des données pour les ravines identifiées par 5 opérateurs ou moins est plus grande que pour les ravines identifiées par au moins 6 opérateurs. Parmi les 75 ravines identifiées par au moins 6 opérateurs (Tableau 8), 61 ont pu être utilisées pour l'analyse du seuil topographique car leurs aires contributives ne sont pas traversées par une route. Les seuils topographiques résultant de ce jeu de données composé sont présentés à la Figure 18. Pour les méthodes QR, PS75 et VW05, les valeurs des coefficients a et b des seuils obtenus à partir du jeu de données composé sont compatibles avec celles qui sont définies sur base des jeux de données des 11 opérateurs. Au contraire, lorsqu'on applique la méthode VDK98 au jeu de données composé, la position du seuil résultant est supérieure aux seuils définis sur base des jeux de données des 11 opérateurs.

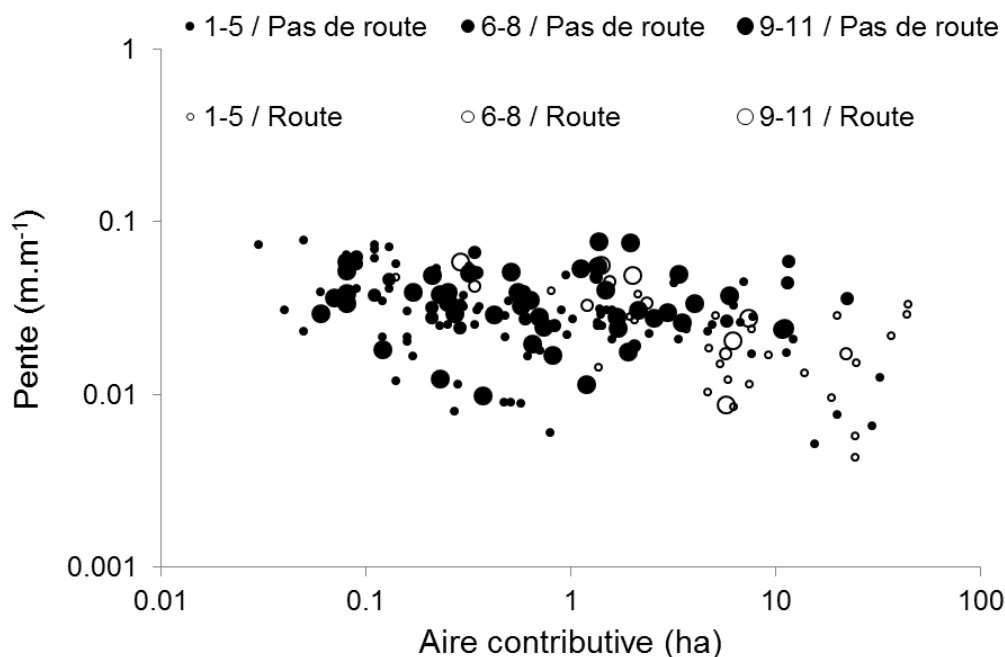


Figure 20: Pente et aire contributives aux points d'incision de toutes les ravines de Type 1. La taille du symbole est liée au nombre d'opérateurs qui ont identifié une ravine donnée. Les symboles pleins se rapportent à des ravines dont les aires contributives ne sont pas traversées par une route.

3. Discussion

3.1. Caractéristiques et classification des ravines

Malgré l'arbre de décision et le catalogue d'images mis à la disposition des opérateurs, et malgré le fait que tous les opérateurs étaient familiers avec les processus d'érosion, 40% des objets digitalisés ont été digitalisés par un seul opérateur et seulement 34% des objets ont été identifiés par plus de la moitié des opérateurs (Tableau 8). Cela démontre que l'identification des ravines sur les photographies aériennes est particulièrement subjective. Cependant, les opérateurs n'ont peut-être pas tous rigoureusement suivi la méthodologie pour l'identification des ravines mais ont plutôt fondé leurs décisions sur leur propre expérience.

Les analyses statistiques ont révélé que certaines caractéristiques peuvent faciliter la détection des ravines telles que la longueur de l'objet, le nombre de parcelles traversées et le type de culture le long de la trajectoire de la ravine. Plus l'objet est long, plus il est probable que la ravine coïncide avec un axe de concentration du ruissellement sur au moins une partie de sa longueur, et plus l'objet sera facilement identifié.

Au moment où les images ont été prises, la couverture végétale des cultures de printemps était la plus élevée pour les betteraves (semées en avril) et la plus faible pour les pommes de terre et le maïs (semés plus tard, en mai). Le contraste entre la végétation et le sol nu dans la ravine était donc plus important en betterave qu'en pomme de terre ou maïs. Ceci a certainement

facilité la détection des ravines dans les champs de betteraves. Même si la couverture végétale était également élevée pour le froment d'hiver (semé en Novembre), le contraste entre la ravine et la culture était faible en raison de la couleur jaunâtre du froment en été. Les ravines formées en hiver peuvent parfois être recolonisées par les mauvaises herbes. Cela peut également expliquer pourquoi la détection des ravines dans le froment d'hiver est plus subjective que pour les autres cultures.

Le nombre de parcelles traversées par une ravine semble également être un facteur important pour aider à la détection des ravines. En effet, cela augmente la probabilité qu'une ravine traverse un champ avec une couverture végétale qui contraste. Ces trois facteurs - la longueur des ravines, la culture et le nombre de parcelles traversées - ne sont évidemment pas indépendants. Les longues ravines traversant plusieurs parcelles, dont des champs de betteraves, ont plus de chances d'être détectés par un grand nombre d'opérateurs.

Les 103 ravines détectées par un seul opérateur ont été réinterprétées par l'opérateur principal. Le Tableau 11 montre que ces objets correspondent pour la plupart à des rigoles ou des zones d'érosion diffuse (Figure 21c et d). D'autres sources importantes d'erreurs sont dues à des objets linéaires tels que des traces de roues, des entrées de champ ou à l'hétérogénéité du couvert de la culture en raison de problèmes avec la machine pour le semis. Les objets sinueux sans signes évidents d'érosion mais correspondant à des axes de concentration du ruissellement et contrastant avec leur environnement proche ont également porté à confusion (Figure 21b). Ils correspondent certainement dans la plupart des cas à des différences de croissance de culture en raison de différences dans le régime en eau dans les vallons secs. Cependant une validation sur le terrain serait nécessaire pour le confirmer. La présence de tels objets peut expliquer pourquoi la sinuosité n'est pas ressortie comme un facteur qui influence significativement le nombre d'opérateurs qui ont identifié le même objet. Enfin, certaines erreurs d'identification sont dues à des dépôts de sédiments dans les sillons au niveau du thalweg lorsqu'ils sont orientés perpendiculairement au thalweg (Figure 21a). Même si ces objets sont discontinus, ils ont parfois été digitalisés alors que l'arbre de décision préconisait le contraire.

Tableau 11: Réinterprétation par l'opérateur principal des 103 objets identifiés comme ravines par un seul opérateur

Réinterprétation de l'objet	Nombre d'objets
Elément linéaire (traces de roues, entrée de champ, couvert hétérogène lié à un problème avec la machine de semis)	22
Erosion diffuse	30
Dépôt dans des sillons croissant un thalweg	8
Axe de concentration du ruissellement sans signe d'érosion	16
Rigoles	27
Total	103

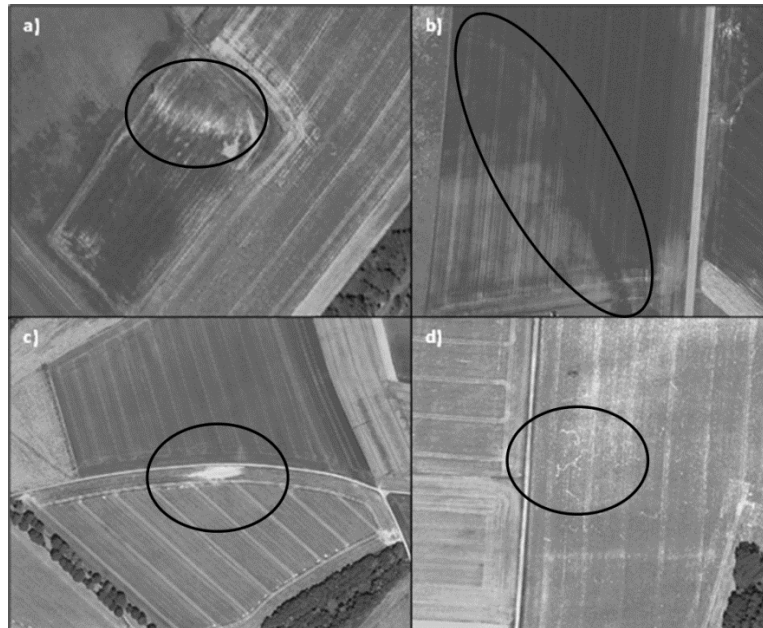


Figure 21: Quatre objets interprétés à tort comme des ravines: (a) dépôt dans les sillons qui traversent un thalweg, (b) axe de concentration du ruissellement sans signe d'érosion, (c) érosion diffuse, (d) rigoles.

La plupart des ravines de Type 2 identifiées par un seul opérateur semblent être des rigoles plutôt que des ravines. Une ravine est définie comme un chenal avec une section minimale de 929 cm^2 (Hauge, 1977). Sur base d'une profondeur de 15 à 20 cm, la largeur d'une rigole dépasse donc rarement la résolution des images (0,5 m), ce qui rend leur identification beaucoup plus difficile et conduit à des écarts plus importants entre les opérateurs. Les problèmes d'identification liés aux ravines de Type 3 sont liés à des zones de sol nu dues à des traces de roues ou des entrées de champ. De même, les zones de sol nu causées par des problèmes avec les machines de semis sont interprétées par certains opérateurs comme des ravines de Type 3 (Tableau 11 and Figure 21c). Malgré une concordance plus importante entre les opérateurs en ce qui concerne l'identification des ravines de type 1, ces dernières induisent également d'importantes sources d'erreur. En effet, 59% des ravines classées en Type 1 ont été identifiées par moins de 6 opérateurs. Comme déjà mentionné ci-dessus, des contrastes dans des vallons liés à des différences de croissance végétale (Figure 21b), des dépôts de sédiments dans les sillons (Figure 21a) ou des signes d'érosion diffuse (Figure 21c) sont interprétés par certains opérateurs comme des ravines.

Tout comme l'identification des ravines, la classification des ravines s'est avérée quelque peu subjective selon le type de ravine. Les ravines de Type 1 sont celles qui ont été classées avec la plus grande concordance par les opérateurs (Tableau 8 et Tableau 9). Ceci peut être attribué à leur plus grande longueur, facilitant ainsi leur détection, mais également au fait que les ravines de Type 1 digitalisées par au moins 10 opérateurs sont aussi celles qui sont le plus clairement situées sur un axe de concentration du ruissellement ou celles qui sont ramifiées. Une confusion entre ravine de Type 1 et de Type 2 est possible lorsque la ravine ne coïncide pas avec un axe de concentration du ruissellement bien défini. Des confusions occasionnelles entre

ravines de Type 1 et de Type 3 ont pu se produire quand un élément linéaire comme un bord de champ ou une trace de roues coïncidait avec un axe de concentration du ruissellement.

3.2. Localisation des points d'incision des ravines

La distance standard moyenne des points d'incision localisés par les différents opérateurs était de 14,8 m. Outre la subjectivité liée à l'opérateur lorsqu'il doit décider où commence la ravine, deux autres facteurs affectent la distance standard: le nombre d'opérateurs qui ont identifié la ravine et le type de ravine. La Figure 16 montre que la distance standard moyenne augmente avec le nombre d'opérateurs mais se stabilise autour de 18 m à partir de 8 opérateurs. Les ravines de Type 2 présentent la plus petite distance standard et celles de Type 1 la plus grande. Cela indique une plus grande difficulté à positionner le point d'incision pour les ravines de Type 1. En effet, les ravines de Type 2 résultent généralement d'un flux d'eau unique, alors que celles de Type 1 résultent de la convergence de plusieurs flux d'eau laissant plus de place à l'interprétation concernant l'emplacement du point d'incision. Il est à noter cependant que la distance standard moyenne observée de 14,8 m correspond à une distance de 6 mm sur l'écran lors de l'affichage des photographies aériennes à l'échelle 1: 2500. Le positionnement des points d'incision des ravines peut dès lors être considéré comme assez uniforme entre les opérateurs. Cependant, bien que la distance standard moyenne soit un peu plus petite que le buffer utilisé pour l'analyse du seuil topographique (25 m), elle est plus grande que la résolution du MNT (10 m). Par conséquent, l'incertitude sur le positionnement des points d'incision des ravines peut contribuer à des variations supplémentaires entre les opérateurs lors de la caractérisation du seuil topographique.

3.3. Analyse du seuil topographique

La Figure 18 montre que la méthode PS75 est la plus sensible à l'opérateur. Cela est confirmé par les écarts-types deux fois plus élevés des coefficients a et b pour cette méthode par rapport aux trois autres (Equation 1 et Tableau 10). Ceci s'explique par le fait que la méthode PS75 ne repose sur aucune base statistique et est très sensible aux valeurs extrêmes. En moyenne, cette méthode induit une valeur de b (pente du seuil) plus élevée, même si elle n'est pas significativement différente de celle des trois autres méthodes. Ces dernières présentent des valeurs de b semblables. Les positions des seuils (valeur de a) varient d'un facteur 2 entre les 4 méthodes, avec une différence significative entre les méthodes VW05 et QR. La position en moyenne plus basse du seuil défini par la méthode VW05 est liée au fait qu'elle dépend des points les plus bas, ce qui la rend sensible aux valeurs extrêmes. Ceci n'est pas le cas pour la méthode PS75 car la pente du seuil est généralement plus élevée que la méthode VW05 basée sur la pente de la régression orthogonale. Si l'on considère les 11 opérateurs, la méthode QR aboutit à la position la plus élevée de seuil topographique en moyenne. Cependant cela est fortement influencé par les jeux de données des opérateurs 4 et 11. Ces deux jeux de données, induisent des valeurs très élevées de quantile lorsque l'on applique la méthode QR (Tableau 10). Les quantiles utilisés pour les opérateurs 4 et 11 étaient $> 0,4$, alors qu'ils étaient $< 0,22$ pour tous les autres opérateurs (Tableau 10). Si l'on exclut les opérateurs 4 et 11, on observe une

tendance qui montre que la position du seuil, et donc le quantile, diminuent lorsque le nombre de ravines d'un jeu de données augmente (Figure 22). Cependant, un plus grand nombre d'opérateurs avec des jeux de données de ravines plus ou moins importants seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

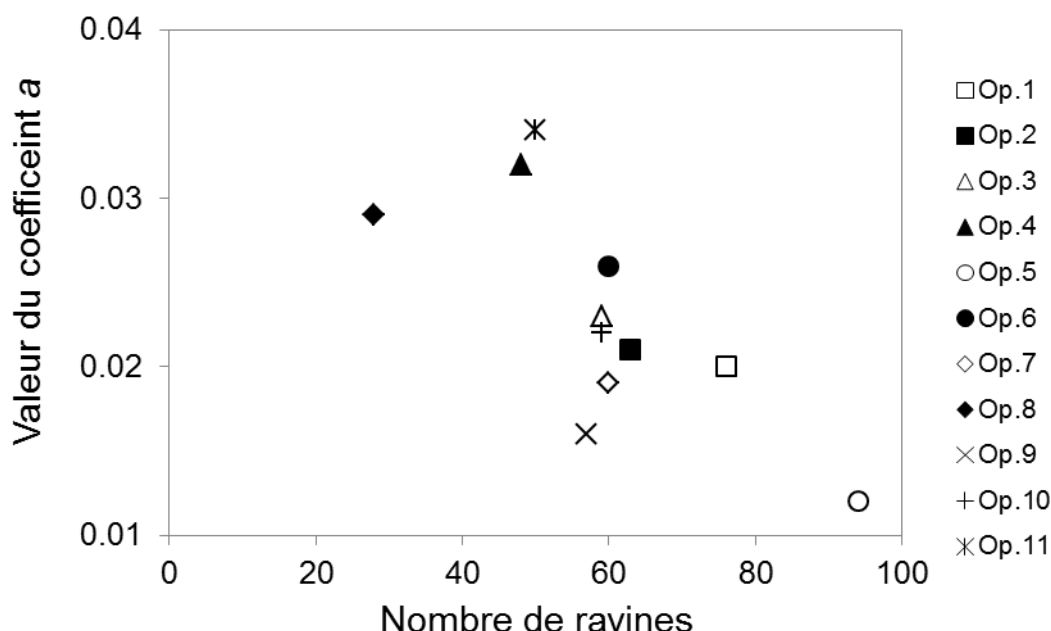


Figure 22: Relation entre le nombre de ravines dans un ensemble de données et la valeur du coefficient a (Equation 1) obtenue par la méthode QR et qui définit la position du seuil topographique. Chaque point correspond au jeu de données d'un opérateur.

La position du seuil topographique induite par la méthode VDK98 est également sensible à la qualité du jeu de données. Ceci est clairement mis en évidence par l'analyse des seuils topographiques liés au jeu de données composé. La valeur a du seuil topographique résultant du jeu de données composé en utilisant la méthode VDK98 est supérieur à la valeur a des seuils topographiques résultant des jeux de données individuels (Figure 18 et Figure 23). L'explication est que l'intervalle de confiance à 95% résultant de jeu de données composé est beaucoup plus petit que les intervalles de confiance à 95% des données de chaque opérateur individuel. En effet, contrairement aux jeux de données individuels qui incluent des objets ayant une faible probabilité d'être des ravines (ravines identifiées par quelques opérateurs seulement), les 61 ravines du jeu de données composé ont une forte probabilité d'être de «vraies» ravines, ce qui aboutit à un plus petit intervalle de confiance à 95% et ainsi une position plus élevée du seuil. Les quatre méthodes de seuillage sont donc sensibles à l'opérateur, avec un impact moins important pour les seuils topographiques déterminés par les méthodes QR et VDK98. En outre, les seuils topographiques définis avec la méthode QR sont généralement mieux ajustés à la limite inférieure du nuage de points (Figure 23). Etant donné que la position moyenne du seuil topographique défini par la méthode VDK98 est plus basse que pour la méthode QR, et étant donné que ce seuil n'est pas toujours bien ajusté à la limite inférieure du nuage de points dispersion, on peut s'attendre à ce que le seuil défini par la méthode VDK98 surestime les

conditions de pente et d'aire contributive susceptibles d'initier des ravines. Au contraire, le seuil topographique défini avec la méthode QR conduit au rejet de conditions topographiques qui sont considérées comme favorables à l'initiation des ravines sur la base d'autres méthodes de seuillage. Cependant, la probabilité liée au rejet de ces conditions est connue car elle correspond à la valeur du quantile utilisé pour la régression. Sur base de cette discussion, la méthode QR semble donc être la méthode la plus appropriée lorsque l'incertitude sur le jeu de données est importante.

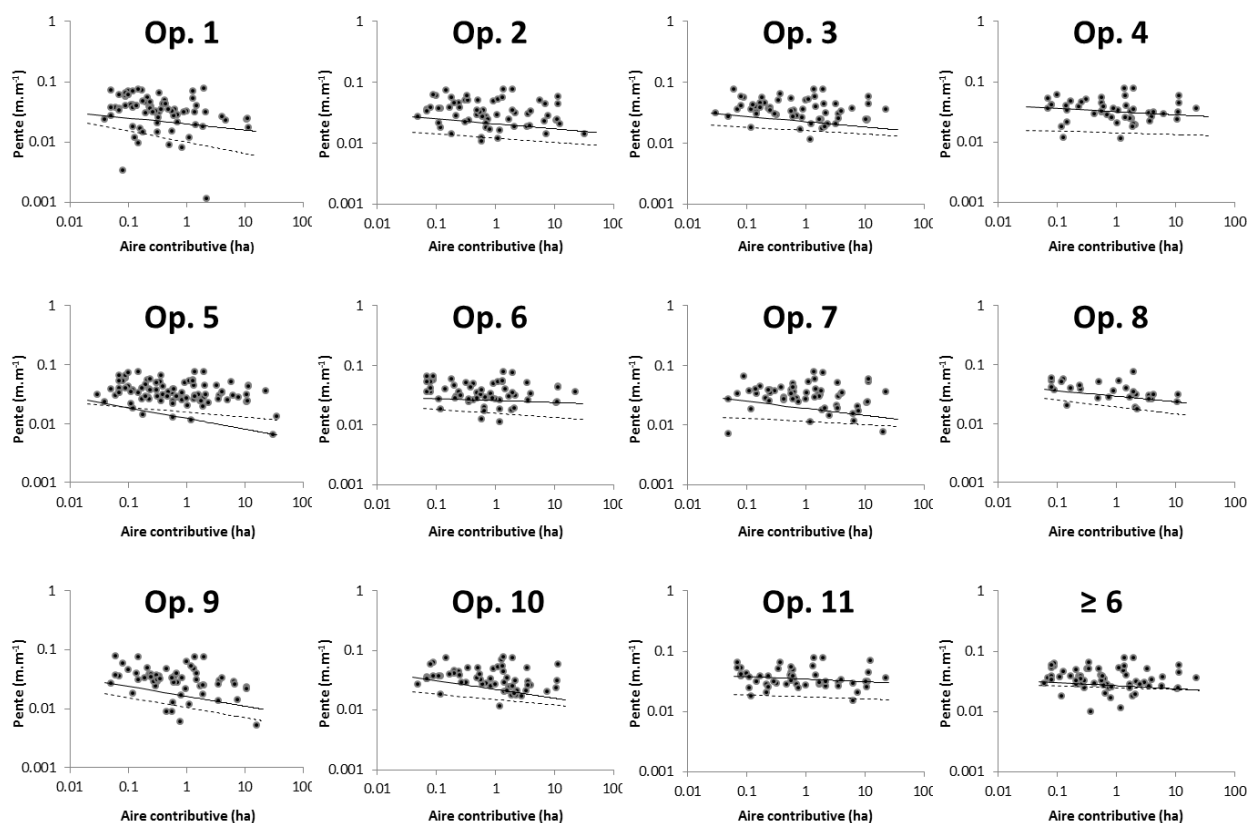


Figure 23: Seuils topographiques obtenus par la méthode QR (traits pleins) et VDK98 (lignes en pointillés) pour les 11 jeux de données (Op.) ainsi que pour le jeu de données composé (≥ 6) comprenant les ravines de Type 1 identifiées par au moins six opérateurs et dont les aires contributives ne sont pas traversées par une route. Les coefficients de régression sont présentés dans le Tableau 10.

Une comparaison des 11 jeux de données avec des données de terrain aurait été très utile, mais en l'occurrence impossible compte tenu de la date d'acquisition des images (2006) et la courte durée de vie des ravines. Cela aurait permis de mieux préciser le type de ravine, les facteurs qui facilitent ou entravent la détection des ravines (par exemple, la longueur, la largeur, les facteurs environnementaux) et la précision avec laquelle les caractéristiques des ravines peuvent être évaluées. Considérant la résolution des images, nous pouvons nous attendre à ce que des ravines étroites et profondes n'aient pas été détectées de manière fiable, en raison de leur faible largeur, mais aussi parce que ce type de ravine correspond généralement à des ravines d'hiver (Vanwalleghem et al., 2005), donc situées dans des champs de céréales d'hiver qui offrent un contraste médiocre pour la détection des ravines.

L'utilisation d'images avec une meilleure résolution permettrait probablement de diminuer l'incertitude dans la détection des ravines et leur délimitation, bien qu'une visualisation à une plus grande échelle ($> 1: 2500$) soit probablement nécessaire. Une autre façon de diminuer

l'influence de l'opérateur serait de recourir à l'automatisation, telle que pratiquée dans certaines études récentes de cartographie des ravines (voir, par exemple, Knight et al., 2007; Eustace et al., 2011; Shruthi et al., 2011). Cependant, ces études supposent qu'aucune erreur n'affecte les jeux de données de référence utilisés pour l'entraînement et la validation bien qu'ils soient majoritairement acquis par numérisation manuelle. Les divergences entre les ravines détectées automatiquement et manuellement sont ainsi attribuées exclusivement à l'algorithme d'automatisation (par exemple, Eustace et al., 2011; Shruthi et al., 2011), alors qu'une partie substantielle pourrait s'expliquer par la subjectivité lors de l'interprétation manuelle des images. Comme l'ont souligné récemment Gardin et al. (2011), la performance de l'opérateur humain est rarement remise en question dans les études de télédétection en général, et encore moins dans les systèmes d'analyse d'images automatisée. Une évaluation appropriée des systèmes automatisés devrait inclure une analyse de l'incertitude des jeux de données de référence, y compris l'incertitude due à l'opérateur. Sarmiento et al. (2009) ont récemment proposé une méthodologie pour intégrer cette incertitude dans le cadre d'une étude sur la classification de l'usage des terres par télédétection. Notre étude repose sur des opérateurs avec plusieurs années d'expérience dans le domaine de l'érosion mais néanmoins encore inexpérimenté en matière d'identification de ravines sur des images aériennes. Le même travail avec des opérateurs expérimentés et entraînés aurait probablement réduit les écarts entre les opérateurs.

4. Conclusions

Les caractéristiques des ravines telles que leur nombre, la longueur totale, l'emplacement du point d'incision et la classification varient considérablement entre les opérateurs, en dépit d'une méthodologie normalisée. Les ravines situées sur des axes de concentration du ruissellement bien définis sont les plus facilement identifiées et classées. Les ravines longues qui traversent plusieurs parcelles, notamment des champs de betteraves sont les plus faciles à détecter. Quelle que soit la méthode utilisée pour définir le seuil topographique pour l'initiation des ravines, il existe une forte variabilité des coefficients du seuil entre les opérateurs. Cette variabilité résulte de la différence du nombre de ravines identifiées par chaque opérateur mais aussi de la qualité des jeux de données. La méthode PS75 est la plus sensible aux différences entre les opérateurs, alors que la méthode QR est l'une des méthodes de seuillage les plus robustes. Celle-ci est particulièrement recommandée lorsque le niveau d'incertitude sur les données de ravines est élevé. Dans les études à venir, les incertitudes résultant de l'identification manuelle des ravines ne doivent pas être négligées. L'évaluation de l'impact de la subjectivité de l'opérateur sur la qualité des données devrait donc être une étape essentielle dans tout système d'interprétation d'images de ravine qu'il repose en partie (approches automatisées) ou en totalité sur l'interprétation manuelle.

Caractérisation des facteurs contrôlant l'arrêt des ravines

Peu d'informations sont présentes dans la littérature en ce qui concerne les facteurs à l'origine de l'arrêt des ravines. Cette information est pourtant d'une importance cruciale pour prédire leur longueur et la quantité de sédiments exportés (voir par exemple Nachtergaele et al., 2001). Une telle information permettrait également d'améliorer notre compréhension du rôle des ravines dans la connectivité du ruissellement au niveau des bassins versants agricoles et pourrait se révéler utile pour promouvoir des modes de gestion des terres ou des pratiques qui limiteraient la longueur des ravines.

Selon Poesen et al. (2003), les ravines se terminent généralement lorsque la capacité de transport des sédiments par le ruissellement concentré diminue et / ou lorsque la résistance du sol à l'érosion augmente fortement. Une augmentation de la résistance du sol à l'érosion peut être induite par des changements de couverture végétale (Beuselinck et al., 2000). Elle peut aussi être due à une augmentation de la charge caillouteuse en surface ou à des changements de rugosité du sol résultant de pratiques de travail du sol différentes le long de la trajectoire de la ravine (Knapen et al., 2007). Une baisse de la capacité de transport peut quant à elle être provoquée par plusieurs facteurs. Comme elle est proportionnelle au gradient de pente et au débit, une diminution du gradient de pente ou un élargissement de la section transversale d'écoulement concentré peut déclencher le dépôt d'une ravine (Toy et al., 2002). Une augmentation de la rugosité hydraulique, en raison de changements de couverture du sol ou d'obstacles tels que des digues le long de la trajectoire de ravines, peut aussi conduire à une diminution de la capacité de transport.

Lorsque la fin de la ravine est contrôlée par la pente, il a été suggéré qu'il existe une pente critique en dessous de laquelle la sédimentation se produit. De Ploey (1984) a proposé un modèle de colluvionnement dans lequel l'angle de pente critique dépend de la concentration en sédiments des eaux de ruissellement, du débit et de la taille moyenne des particules de sol transportées. En Belgique et en Région Limoneuse, les zones sujettes aux dépôts sont caractérisées par un seuil critique de pente de 2 à 4% (Poesen et al., 1998; Beuselinck et al., 2000). Vandekerckhove et al. (2000) et Nachtergaele et al. (2001) ont montré que le seuil de pente critique pour le dépôt de sédiments est fortement dépendant des caractéristiques du matériau transporté et des conditions de surface de la zone de sédimentation telles que le pourcentage de couverture végétale, la rugosité de surface ou la charge caillouteuse. Comme la pente critique pour la sédimentation dépend du débit (De Ploey, 1984), des seuils topographiques combinant la pente du terrain et la taille de l'aire contributive ont également été proposés. Au-dessus du seuil topographique, la sédimentation n'est jamais observée, tandis qu'en dessous la sédimentation peut éventuellement se produire (Vandekerckhove et al., 2000). Un inconvénient majeur de ces deux concepts est qu'ils supposent que les ravines prennent fin lorsque la pente ou les conditions topographiques sont inférieures à un certain seuil (valeurs absolues), alors que le dépôt est en fait certainement plutôt tributaire d'un

changement dans les conditions topographiques (valeurs relatives). En outre, les valeurs seuil ne disent rien quant à la probabilité d'occurrence du dépôt lorsqu'elles sont atteintes. Les conditions d'arrêt définies par les seuils pourraient avoir été rencontrées à différentes positions le long de la ravine, mais sans en arrêter effectivement le développement.

L'organisation spatiale de l'utilisation des terres dans les bassins versants agricoles affecte l'arrêt des ravines. Beuselinck et al. (2000) ont souligné que jusqu'à 28% des dépôts de ravines dans la ceinture Limoneuse belge ont lieu à la transition entre des parcelles et sont dus à des changements de rugosité liés à des végétations différentes. Les parcelles en céréale et les prairies constituent de véritables barrières de végétation. Toujours selon cette étude, l'arrêt des ravines dus à la végétation se produit sur des pentes nettement plus élevées que lorsque l'arrêt est contrôlé simplement par la topographie.

Il a également été mis en évidence par certaines études que les routes affectent le ravinement (p.ex. Desmet et al., 1999). On suppose également que les autres éléments linéaires du paysage tels que les talus, les fossés, les haies ou la direction de travail du sol peuvent affecter l'emplacement du point final des ravines. Bien que certaines études ont tenté de prendre en compte les éléments linéaires pour expliquer l'emplacement des ravines ou la sensibilité au ravinement (Conoscenti et al., 2014; Dube et al., 2014, Makanzu Imwangana et al., 2014), peu d'entre elles ont mis en évidence leur impact sur l'arrêt des ravines (Takken et al., 1999).

Il a été démontré que le ravinement varie considérablement en termes de nombre, longueur et type en Wallonie en raison de différences dans les conditions locales telles que la topographie, le sol, le système de culture et son organisation spatiale ou la densité des éléments linéaires (cf. la section sur les caractéristiques et la variabilité spatio-temporelle des ravines en Wallonie). On peut donc s'attendre à ce que les facteurs contrôlant la fin des ravines varient également. L'objectif de ce travail est de quantifier les principaux facteurs impliqués dans l'arrêt des ravines dans quatre régions agro-pédologiques contrastées de Wallonie. Pour ce faire, une base de données de 837 ravines identifiées sur photographies aériennes a été utilisée. Les seuils topographiques et de pente critique pour caractériser les contextes induisant l'arrêt des ravines ont été testés.

1. Matériel et méthodes

1.1. Bases de données et sites d'étude

La base de données # 1 (Tableau 1) couvrant la Région Limoneuse, la Famenne et la Région Jurassique a été utilisée pour caractériser la variabilité spatiale des principaux facteurs contrôlant l'arrêt des ravines. La base de données # 2 qui résulte de l'identification des ravines sur deux régions (Région Limoneuse / Condroz; Figure 1) a été incluse car elle comporte un grand nombre de ravines observées sur une période de 3 ans.

1.2. Caractérisation des principaux facteurs contrôlant l'arrêt des ravines

A l'extrémité aval de chaque ravine, les facteurs suivants ont été enregistrés: le type d'occupation du sol et/ou le type de culture, la pente, l'aire contributive, la présence d'éléments linéaires comme les routes, les talus ou les haies. Lorsque le point final de la ravine coïncidait avec une limite de parcelle, le type d'occupation du sol et/ou le type de culture des deux côtés de la limite parcellaire ont été enregistrés. Le type d'occupation du sol et le type de culture ont été extraits du parcellaire du SIGEC mis à jour annuellement par le SPW et de la carte d'occupation du sol de Wallonie de 2007 lorsque l'occupation du sol n'était pas de type agricole. Les valeurs de pente ont été extraites de la carte des pentes dérivée du MNT 10 m. Les valeurs d'aire contributive ont été extraites du raster d'accumulation des flux dérivé du raster de direction d'écoulement selon la méthode D8. La présence d'éléments linéaires et leur nature a été déterminée sur base des photographies aériennes en s'aidant de la carte topographique de l'IGN qui renseigne la plupart d'entre eux. En cas de ravines discontinues le long d'un axe de concentration du ruissellement, chaque extrémité aval de segment a été considérée comme un point d'arrêt de ravine. Des analyses de la variance ont été effectuées pour tester un effet significatif de la région agricole mais aussi du type de végétation sur la pente au point d'arrêt des ravines.

1.3. Seuils de pente critique et seuil topographiques critiques

Pour chaque région agricole, le seuil de pente critique pour l'arrêt des ravines a été défini comme le percentile 90 de la distribution des pentes provoquant l'arrêt des ravines (Nachtergaele et al., 2001). Les seuils topographiques ont été déterminés pour les points d'arrêt des ravines sur base de l'Equation 1 en utilisant la régression quantile. Selon la région agricole et sur base du seuil de pente critique, chaque pixel raviné a été classé en tant que point d'arrêt ou non. Les pixels classés ont ensuite été comparés à l'aide de matrices de confusion aux pixels observés afin d'évaluer la performance du seuil de pente critique pour la prédiction du point d'arrêt des ravines. La même méthode a été utilisée pour évaluer la performance des seuils topographiques.

1.4. Approche probabiliste pour prédire le point d'arrêt des ravines contrôlé par la topographie

Dans chaque région agricole, différentes caractéristiques topographiques ont été extraites pour chaque pixel de 10 m le long de la trajectoire des ravines. La pente du pixel i , l'aire contributive du pixel i et les variations de pente avant et après le pixel i ont été enregistrées. Les variations de pente ont été calculées avant et après chaque pixel sur une distance de 20 m ($\text{pente}_{i, i-2}$ et $\text{pente}_{i, i+2}$). La variation de pente totale ($\text{pente}_{i+2, i-2}$) a également été extraite. Les variations de pente ont été utilisées pour mettre en évidence les ruptures de pentes et leurs

intensités à proximité des points d'arrêt des ravines. Des régressions logistiques multivariées ont ensuite été effectuées pour créer un modèle de prédiction des points d'arrêt des ravines.

2. Résultats

2.1. Variabilité régionale des principaux facteurs contrôlant l'arrêt des ravines

Au total 837 points d'arrêt de ravines ont été analysés. Ils ont été classés selon l'une des quatre situations suivantes (Figure 24 et Tableau 12): (1) la ravine se termine en bord de parcelle contre un élément linéaire comme un talus, une route, un fossé ou une haie. Ces points sont nommés par la suite les «points d'arrêt contrôlés par un élément linéaire»; (2) la ravine se termine en bord de parcelle mais pas contre un élément linéaire. Dans la plupart des cas, cela est dû à un changement de couverture végétale d'une parcelle à l'autre. Ce type de point est nommé par la suite «point d'arrêt contrôlé par la végétation»; (3) la ravine se termine à la suite d'un changement de direction du travail du sol lié à une fourrière. Ces cas ont été nommés «points d'arrêt contrôlés par une fourrière»; (4) la fin de la ravine est située à l'intérieur des limites de la parcelle, mais n'a pas été causée par un changement dans la direction du travail du sol. On suppose que, dans ces cas, l'arrêt de la ravine résulte de changements dans les conditions topographiques. Par conséquent, ces situations ont été appelées «points d'arrêt contrôlés par la topographie». Dans certains cas, pour des ravines se terminant au niveau de bord de champs, il n'a pas été possible de déterminer de façon fiable si l'arrêt avait été provoqué par un changement de végétation ou par un élément linéaire. Ces cas représentent 1,3% de tous les points finaux de ravine et ont été classés dans une catégorie distincte.

En Région Limoneuse et en Famenne, les ravines prennent principalement fin en raison de changements de végétation d'une parcelle à l'autre et, dans une moindre mesure, pour des raisons topographiques (Tableau 12). Dans la zone Condroz / Région Limoneuse, les points d'arrêt des ravines sont contrôlés par la végétation et la topographie dans une proportion équivalente. Contrairement aux trois autres régions, l'emplacement des points d'arrêt des ravines en Région Jurassique est principalement contrôlé par des éléments linéaires. La proportion de points d'arrêt contrôlés par des éléments linéaires est 3 à 4 fois plus élevée dans la Région Jurassique que dans les autres régions agricoles. Quelle que soit la région agricole, la proportion de points d'arrêt contrôlés par une fourrière est faible (<6%). Une relation inverse entre la proportion de points d'arrêt contrôlés par la végétation ou des éléments linéaires et la taille moyenne des parcelles cultivées a été observée (Tableau 2 et Tableau 12; Figure 25). Il y a également une corrélation positive entre le pourcentage de points d'arrêt contrôlé par des éléments linéaires et la densité des éléments linéaires présents en bordure des terres cultivées (Figure 25).

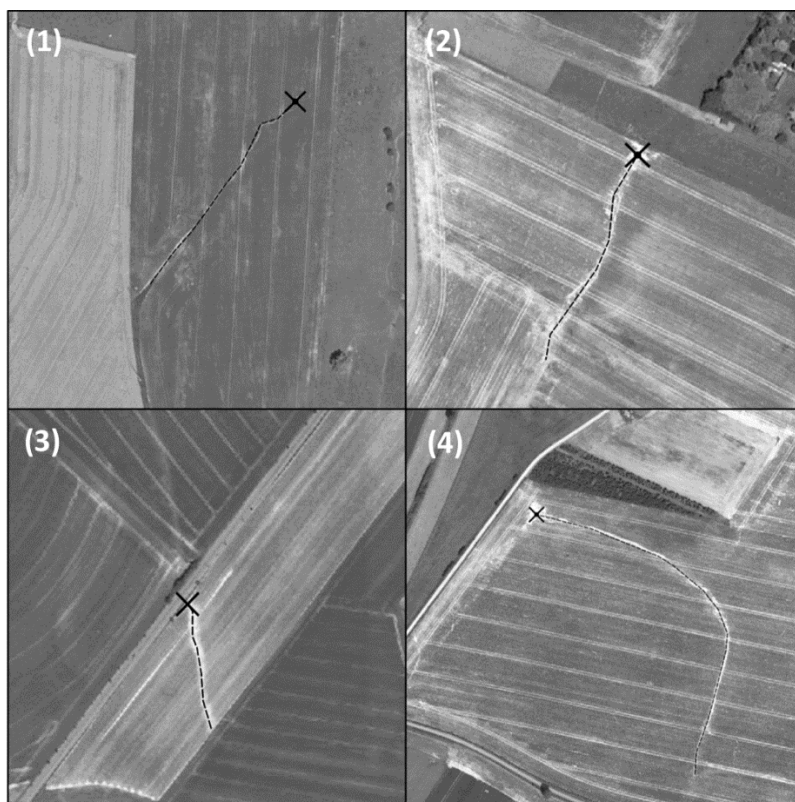


Figure 24: Exemples de points d'arrêt de ravines contrôlés par (1) la topographie, (2) des changements de couverture végétale (dans ce cas, betterave vers prairie), (3) des éléments linéaires (ici, un talus associé à une route) et (4) une fourrière. Les lignes pointillées indiquent les ravines et les croix indiquent leurs points d'arrêt.

Tableau 12: Nombre total et proportion des différents facteurs à l'origine de l'arrêt des ravines dans les 4 sites d'étude

Région agricole	Nombre total de points d'arrêt	Ravines contrôlées par				
		la végétation	des éléments linéaires	des fourrières	la topographie	des éléments linéaires ou la végétation
Région Limoneuse	256	115 (45%)	37 (15%)	16 (6%)	80 (31%)	8 (3%)
Famenne	41	24 (55%)	4 (10%)	1 (2%)	15 (33%)	0 (0%)
Région Jurassique	146	51 (35%)	65 (45%)	5 (3%)	22 (15%)	3 (2%)
Condroz/ Région Limoneuse	394	174 (44%)	37 (10%)	9 (2%)	174 (44%)	0 (0%)

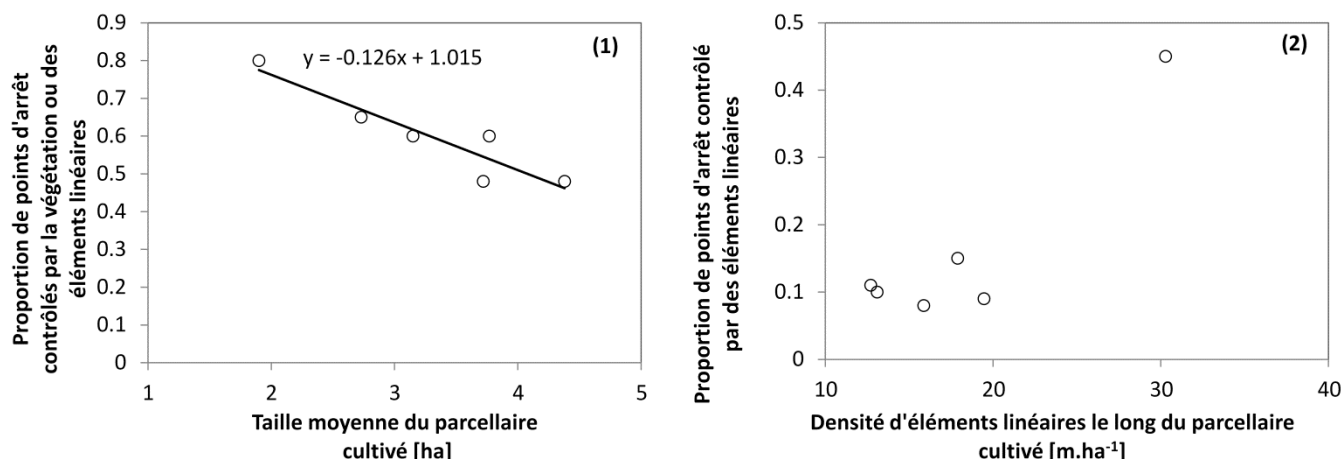


Figure 25: Relations entre (1) la proportion de points d'arrêt contrôlés par la végétation et des éléments linéaires et la taille moyenne des parcelles cultivées; (2) la proportion de points d'arrêt contrôlés par des éléments linéaires et la densité des éléments linéaires présents en bordure de parcelle. Chaque symbole correspond à une région agricole. La zone à cheval sur le Condroz et la Région Limoneuse a été décomposée selon les trois jeux de données de photographies aériennes (1999, 2006, 2009).

2.2. Points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie

Pour les points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie, la pente moyenne locale au point d'arrêt varie considérablement selon les régions agricoles. La pente moyenne au point d'arrêt en Région Limoneuse est significativement plus faible qu'en Région Jurassique et en Famenne (Tableau 13; respectivement $p < 0,001$ et $p = 0,023$). La Région Jurassique présente la plus forte pente moyenne locale pour les points d'arrêt des ravines qui est aussi significativement différente de celle observée en Condroz / Région Limoneuse ($p < 0,001$). Une forte corrélation a été observée entre la pente moyenne locale au niveau des points d'arrêt des ravines et la pente moyenne des parcelles cultivées ($r = 0,99$). Un recouvrement important a également été observé entre les distributions des valeurs de pente pour les pixels ravinés et ceux où les points d'arrêt des ravines sont localisés, et cela quelle que soit la région agricole (Figure 26). Les seuils de pente critique sont compris entre 5,4% et 12,8% selon la région agricole (Tableau 13).

Il n'a pas été possible de déterminer le seuil topographique pour la Famenne en utilisant la régression quantile à cause d'un nombre insuffisant de ravines ($n = 15$, Tableau 12). La Figure 27 montre le seuil topographique pour l'arrêt des ravines pour la Région Limoneuse, le Condroz / Région Limoneuse et la Région Jurassique. Les pentes des seuils topographiques relatifs à l'arrêt des ravines en Région Limoneuse et dans le Condroz / Région Limoneuse sont assez similaires. Cependant, la position du seuil est plus élevée pour le Condroz / Région Limoneuse que pour la Région Limoneuse. La pente du seuil topographique pour les points d'arrêt des ravines est deux fois plus élevée pour la Région Jurassique que pour la Région Limoneuse et le Condroz / Région Limoneuse.

Tableau 13: Pente locale moyenne (\pm écart-type; ET) et seuil de pente critique des points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie en fonction de la région agricole

Région agricole	Pente locale moyenne	Seuil critique de pente
	[%] (\pm ET)	[%]
Région Limoneuse	3.2 (\pm 1.5) ^a	5.4
Famenne	5.2 (\pm 2.1) ^b	7.3
Région Jurassique	7.0 (\pm 4.5) ^b	12.8
Condroz/Région Limoneuse	4.1 (\pm 2.5) ^c	7.6

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes à $p = 0.05$

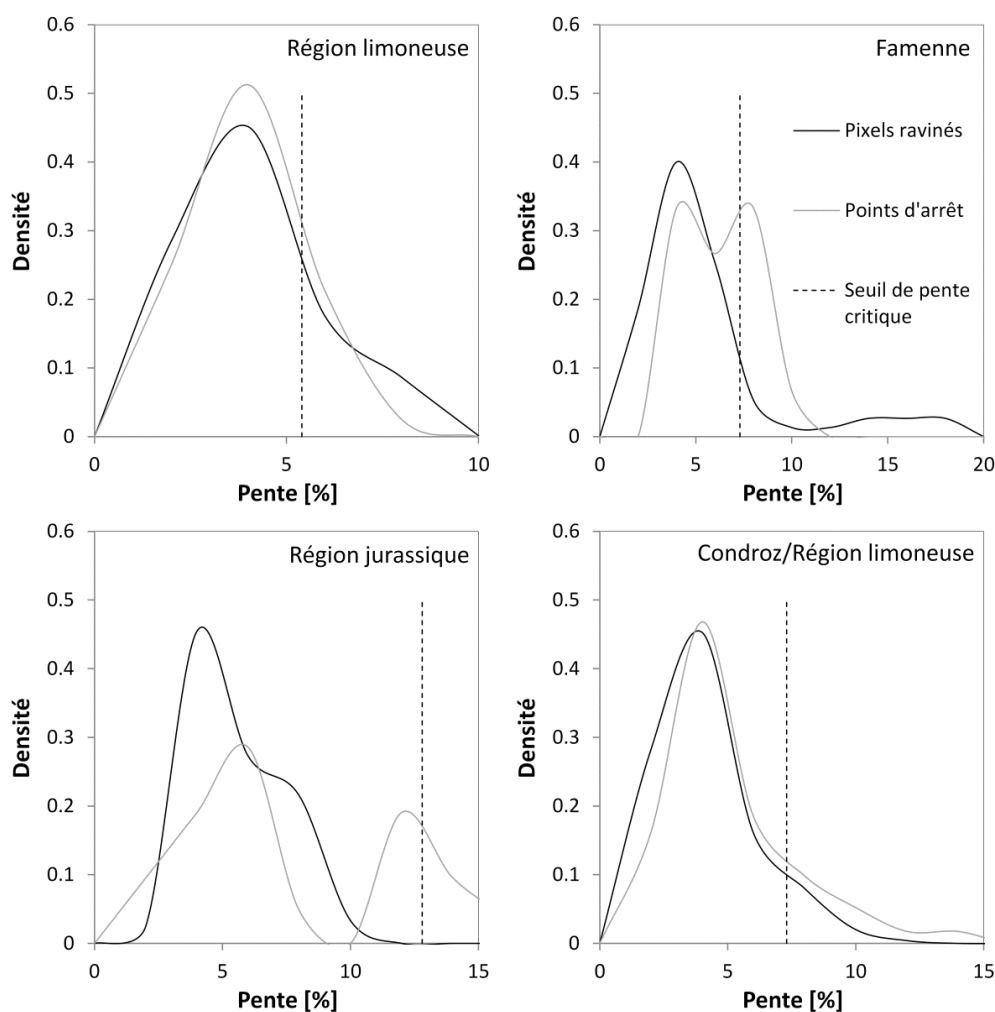


Figure 26 : Distribution des valeurs de pente au point d'arrêt des ravines et le long de la trajectoire de la ravine dans les quatre régions étudiées. Les lignes pointillées correspondent aux seuils de pente critique (Tableau 13).

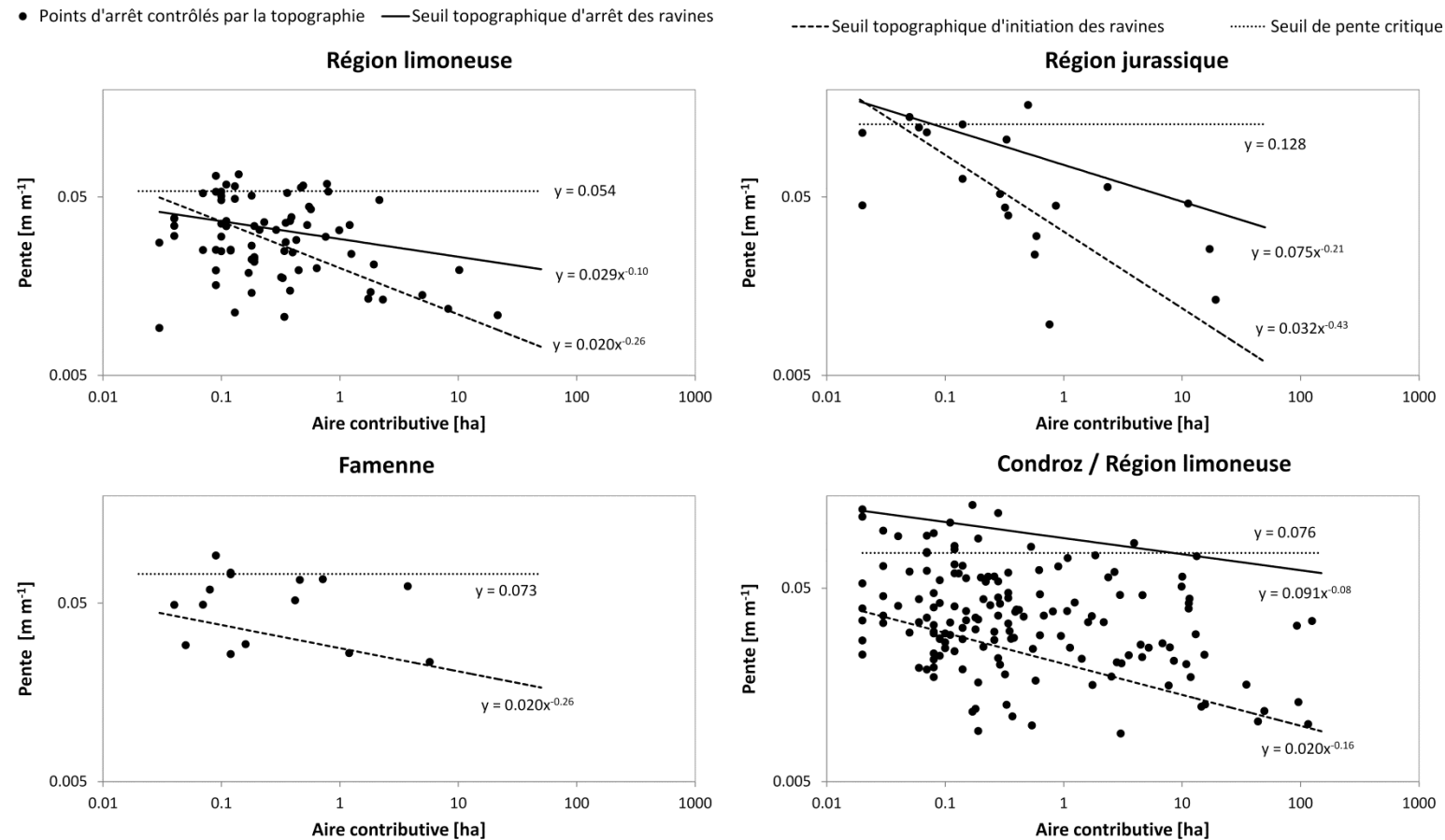


Figure 27: Seuils topographiques pour les points d'arrêt contrôlés par la topographie (lignes continues) et pour l'initiation des ravines (lignes pointillées, voir section sur l'analyse du seuil topographique) et seuil de pente critique pour les points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie (ligne horizontale, Tableau 13). Les seuils topographiques relatifs à l'arrêt des ravines en Région Limoneuse, Région Jurassique et Condroz / Région Limoneuse ont été définis pour les quantiles $\alpha = 0,95$, $0,76$ et $0,97$ respectivement. Pour les seuils topographiques liés à l'initiation des ravines, les quantiles $\alpha = 0,06$, $0,17$, $0,13$ et $0,05$ ont été utilisés pour la Région Limoneuse, la Famenne, la Région Jurassique et le Condroz / Région Limoneuse respectivement.

L'utilisation du seuil de pente critique dans chaque région agricole pour prédire la localisation du point d'arrêt des ravines conduit à classer la plupart des pixels ravinés comme point d'arrêt (85% à 100%). Seulement 8% à 13% des points classés comme points d'arrêt correspondent dans les faits à un point d'arrêt observé (Tableau 14). L'utilisation des seuils topographiques conduit également à classer la plupart des pixels ravinés comme point d'arrêt (88% à 99%) et seulement 3% à 9% correspondent en réalité à des points d'arrêt observés (Tableau 14).

Tableau 14: Matrices de confusion résultant de la classification des pixels ravinés observés en tant que point d'arrêt ou non. La classification est basée sur le seuil de pente critique ou sur le seuil topographique pour chaque zone agricole. No A = pixels ravinés qui n'est pas un point d'arrêt, A = point d'arrêt.

			Classe prédite							
			Région Limoneuse		Famenne		Région Jurassique		Condroz / Région Limoneuse	
			No A	A	No A	A	No A	A	No A	A
Classe observée	Critère de classification	No A	12%	79%	13%	72%	2%	92%	3%	88%
		A	1%	8%	3%	13%	0%	6%	1%	8%
	Seuil topographique	No A	6%	85%	-	-	1%	91%	1%	90%
		A	6%	3%	-	-	0%	8%	0%	9%

Compte tenu du faible nombre de ravines dont l'arrêt était contrôlé par la topographie dans la Région Jurassique et la Famenne (Tableau 12), il n'a pas été possible de mettre au point des régressions logistiques pertinentes sur la base des facteurs topographiques pour ces régions. Les résultats des régressions logistiques concernant la probabilité d'occurrence d'arrêt des ravines sur base des facteurs topographiques sont présentés ci-dessous pour la Région Limoneuse et le Condroz / Région Limoneuse (Equations 2 et 3; Figure 28).

$$p(1|X) = \frac{e^{(-2.26 + 0.27 * \Delta S_{i-2,i+2} * \Delta S_{i,i+2} + 0.18 * \Delta S_{i,i+2} * S_i)}}{1 + e^{(-2.26 + 0.27 * \Delta S_{i-2,i+2} * \Delta S_{i,i+2} + 0.18 * \Delta S_{i,i+2} * S_i)}} \quad (\text{Equation 2})$$

$$p(1|X) = \frac{e^{(-2.36 + 0.28 * \Delta S_{i-2,i+2} * \Delta S_{i,i+2} + 0.19 * \Delta S_{i,i+2} * S_i)}}{1 + e^{(-2.36 + 0.28 * \Delta S_{i-2,i+2} * \Delta S_{i,i+2} + 0.19 * \Delta S_{i,i+2} * S_i)}} \quad (\text{Equation 3})$$

où S_i est la pente du pixel i [%], $\Delta S_{i,i+2}$ est la variation de la pente de pixel i au pixel $i + 2$ [%], $\Delta S_{i-2,i+2}$ est le changement de pente du pixel $i-2$ au pixel $i + 2$ [%].

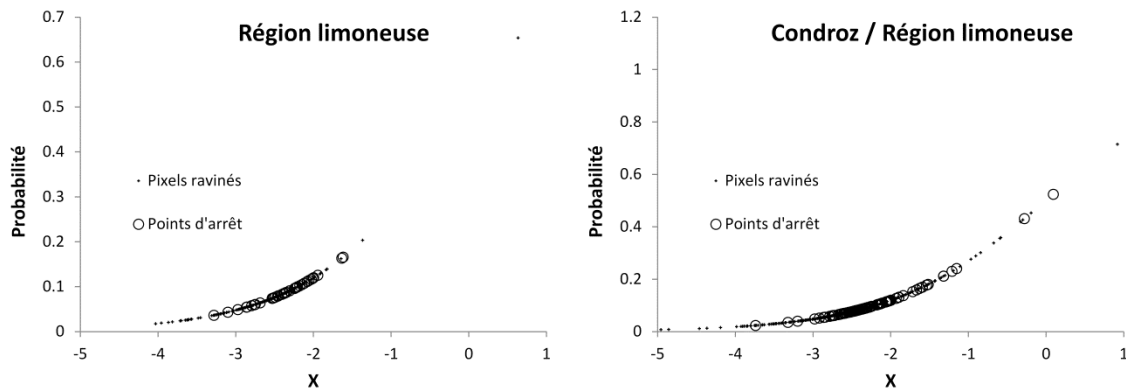


Figure 28: Régressions logistiques appliquées aux jeux de données de la Région Limoneuse (Equation 2) et Condroz / Région Limoneuse (Equation 3). Les points correspondent aux pixels ravinés qui ne sont pas des points d'arrêt et les symboles ronds correspondent aux points d'arrêt contrôlés par la topographie. X est la variable topographique reprise en exponentielle aux Equations 2 et 3.

Les régressions logistiques effectuées dans la Région Limoneuse et le Condroz / Région Limoneuse montrent que l'interaction entre la variation de pente après un pixel donné ($\Delta S_{i,i+2}$) et la variation de pente totale ($\Delta S_{i-2,i+2}$), ainsi que l'interaction entre la variation de pente après un pixel donné et sa pente (S_i) sont les facteurs les plus significatifs. Cependant, les régressions logistiques ne sont pas très pertinentes, car elles ne permettent pas de prédire avec un haut niveau de probabilité l'occurrence des points d'arrêt des ravines (max <17% pour la Région Limoneuse et max <53% pour le Condroz / Région Limoneuse; Figure 28). La Figure 29 montre que les distributions des facteurs topographiques pour les pixels ravinés qui ne correspondent pas à des points d'arrêt et pour les pixels qui sont des points d'arrêt sont assez similaires dans la Région Limoneuse. La même tendance a été observée dans la région à cheval sur le Condroz et la Région Limoneuse (Figure 30).

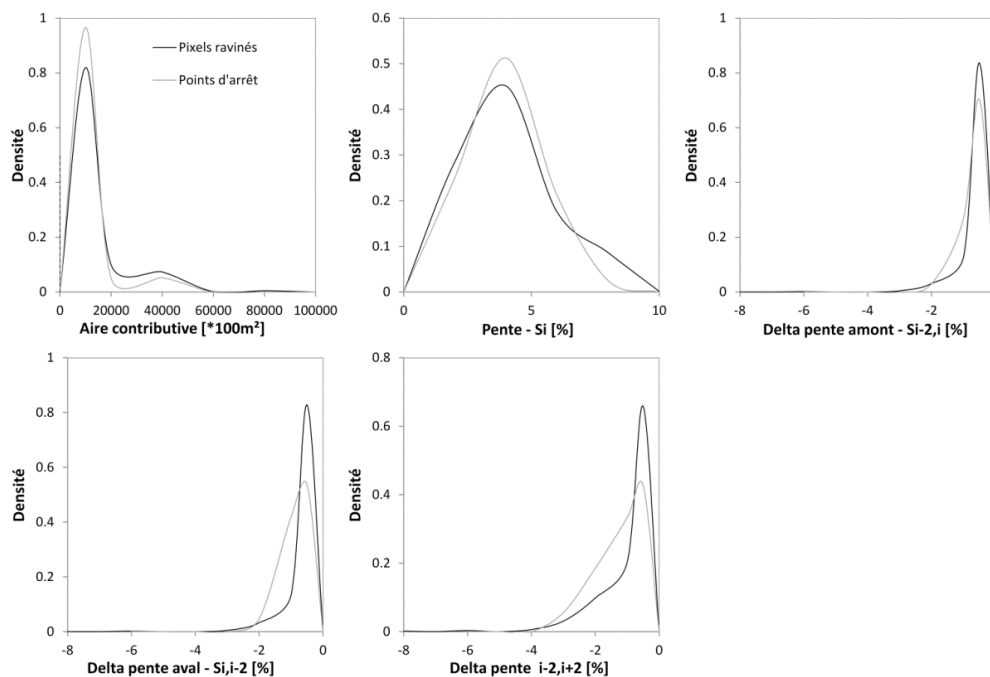


Figure 29: Distributions des facteurs topographiques utilisés pour la régression logistique en Région Limoneuse pour les pixels ravinés et les pixels présentant un point d'arrêt

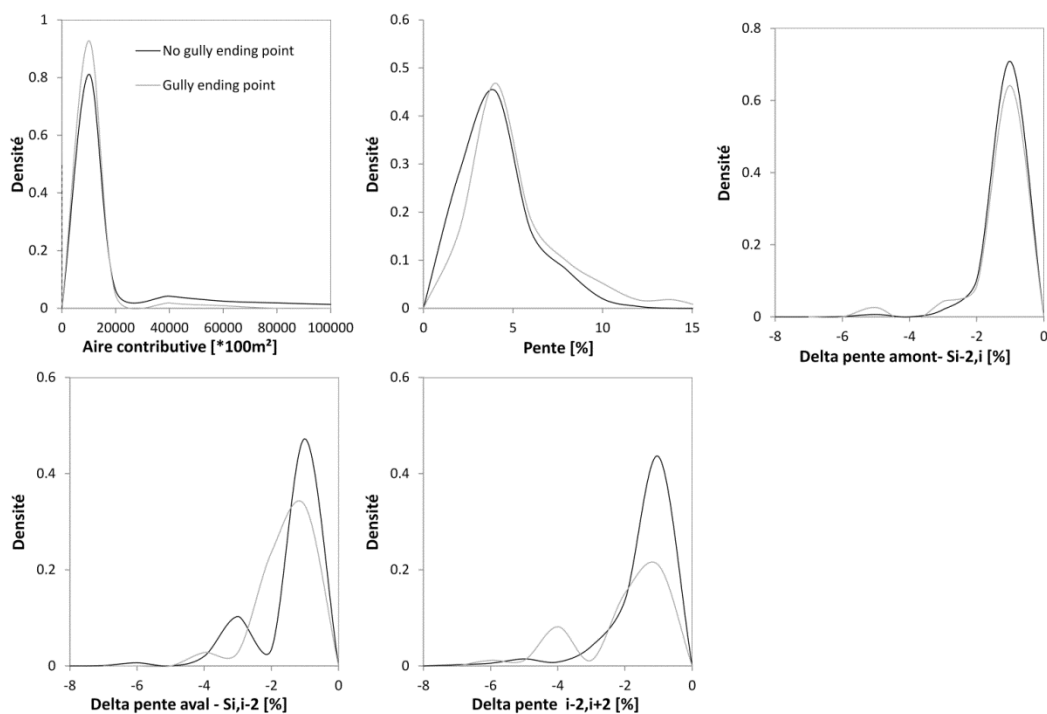


Figure 30: Distributions des facteurs topographiques utilisés pour la régression logistique en Condroz / Région Limoneuse pour les pixels ravinés et les pixels présentant un point d'arrêt

2.3. Points d'arrêt des ravines contrôlés par la végétation

Pour les points d'arrêt des ravines contrôlé par la végétation, le type de végétation à l'aval de la limite parcellaire où s'arrête la ravine est principalement de la végétation avec une forte couverture comme les cultures d'hiver, les prairies et les bandes enherbées (78% à 92%, Tableau 15). Seulement 8% à 16% de points d'arrêt des ravines contrôlés par la végétation sont dus à des cultures de printemps.

Tableau 15: Distribution des types de végétation observée à l'aval des limites parcellaire et causant l'arrêt des ravines.

Région agricole	Type de végétation à l'aval des limites parcellaires causant l'arrêt des ravines			
	Culture de printemps	Culture d'hiver	Prairie ou bande enherbée	Autre (Bois, Culture maraichère...)
Région Limoneuse	15.7%	38.3%	41.7%	4.3%
Famenne	8.0%	46.0%	46.0%	0.0%
Région Jurassique	11.8%	9.8%	70.6%	7.8%
Condroz/Région Limoneuse	13.2%	24.1%	54.0%	8.6%

En Région Limoneuse et dans le Condroz / Région Limoneuse, les ravines sont stoppées sur des pentes significativement plus raides lorsque l'arrêt est provoqué des cultures d'hiver, des prairies et des bandes enherbées que lorsque l'arrêt est provoqué par des cultures de printemps (respectivement $p = 0,008$ et $p = 0,014$; Figure 31). La Figure 32 montre qu'en Région Limoneuse, la probabilité pour une ravine d'être stoppée à une limite parcellaire est toujours plus importante quelle que soit la pente si la parcelle en aval est occupée par une culture d'hiver ou une prairie. Pour une pente de 5% par exemple, la probabilité qu'une ravine soit stoppée par une culture de printemps est de 25% en Région limoneuse contre 85% pour une culture d'hiver ou une prairie. De telles régressions logistiques n'ont pas pu être effectuées de manière fiable pour les cultures d'hiver et prairies dans les autres régions agricoles. Des ravines ont été stoppées sur des pentes allant jusqu'à 8% en Région Limoneuse et jusqu'à 15% dans le Condroz / Région Limoneuse. Dans Région Jurassique et en Famenne aucune différence significative de pente n'a été observée en fonction du type de végétation, mais le nombre de ravines arrêtées par des cultures de printemps est faible (respectivement $n = 6$ et $n = 2$). Cependant, des points d'arrêt ont été observés sur des pentes allant jusqu'à 15% en Région Jurassique et jusqu'à 9% en Famenne en présence de cultures d'hiver et de prairies.

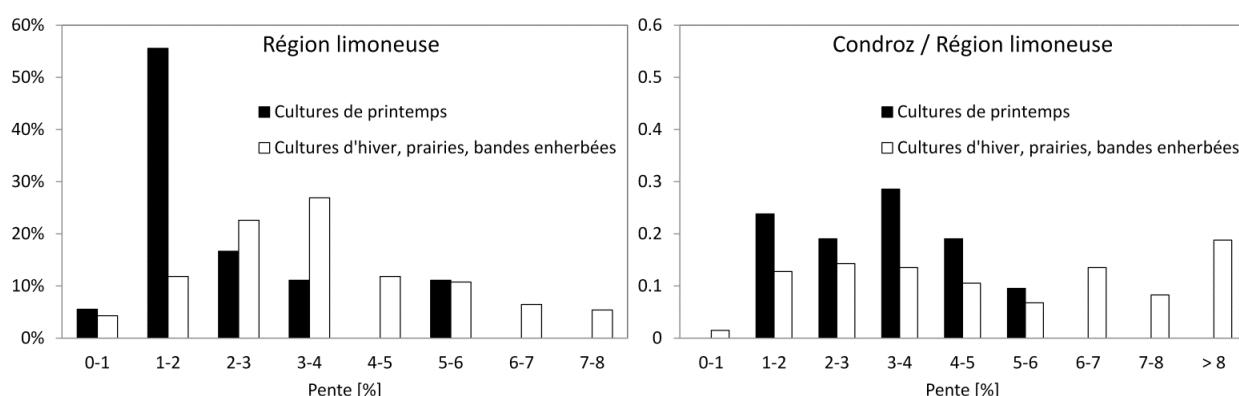


Figure 31: Distribution des valeurs de pente aux points d'arrêt des ravines contrôlées par la végétation en fonction du type de végétation dans la Région Limoneuse et le Condroz / Région Limoneuse.

Parmi les 4 sites d'étude, 124 ravines (soit 15%) traversent plusieurs parcelles et ne sont donc pas affectées par certaines transitions parcellaires. Le Tableau 16 montre que la probabilité d'une ravine de passer d'une parcelle à l'autre est clairement dépendante du type de transition de culture. Quelle que soit la culture en amont, la probabilité qu'une prairie provoque l'arrêt d'une ravine est de plus de 90%. Les bandes enherbées sont également efficaces pour arrêter les ravines provenant de cultures d'été (88%). Lorsque les ravines proviennent de cultures d'hiver, 50% d'entre elles ont été stoppées par une bande enherbée. Cependant, le nombre de transitions observées entre cultures d'hiver et bandes enherbées est faible ($n = 10$; Tableau 16). La probabilité pour qu'une ravine provenant d'une culture de printemps soit arrêtée par une culture d'hiver est de 83%. Au contraire, une ravine provenant d'une culture de printemps a une probabilité de 81% de continuer si la parcelle en aval est également une culture de printemps. Cinquante et un pour cent des transitions entre deux cultures d'hiver causent l'arrêt des ravines. Il est à noter que bien que seules les terres cultivées aient été considérées lors de la digitalisation des ravines, des transitions où la parcelle amont est une prairie ou une bande enherbée sont observées. Elles correspondent en fait à des ravines initiées en culture de

printemps et qui traversent une prairie ou une bande enherbée avant d'atteindre une autre parcelle.

Tableau 16 : Effet de la transition de végétation sur l'arrêt des ravines

Type de transitions de végétation	Nombre de transitions observées le long des ravines	% de ravines stoppées
Culture de printemps - Culture de printemps	132	19%
Culture de printemps - Culture d'hiver	87	83%
Culture de printemps - Prairie	119	98%
Culture de printemps - Bande enherbée	64	88%
Culture de printemps – Bois	22	100%
Culture de printemps – Culture maraîchère	2	0%
Culture d'hiver - Culture d'hiver	37	51%
Culture d'hiver - Culture de printemps	23	57%
Culture d'hiver – Prairie	10	90%
Culture d'hiver - Bande enherbée	10	50%
Culture d'hiver – Bois	1	100%
Prairie – Prairie	1	100%
Prairie- Culture d'hiver	3	33%
Bande enherbée - Culture de printemps	3	33%
Bande enherbée - Culture d'hiver	8	33%
Bande enherbée- Prairie	1	100%

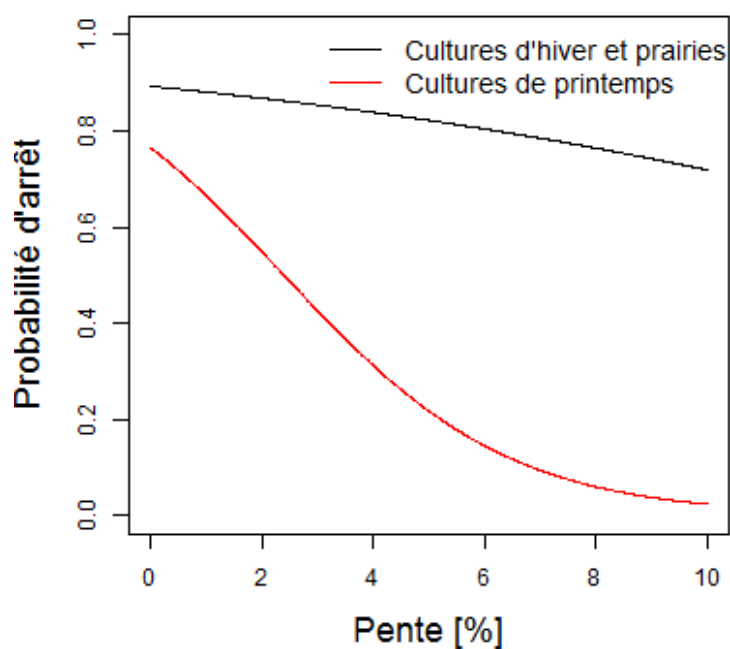


Figure 32 : Probabilité qu'une ravine soit stoppée à une limite parcellaire en fonction de la pente et du type de culture présente sur la parcelle en aval de la limite, en Région Limoneuse.

2.4. Points d'arrêt des ravines contrôlés par des éléments linéaires et des fourrières

Les éléments linéaires contrôlant la fin des ravines sont principalement des talus, des routes ou des haies (Tableau 17). Dans une moindre mesure d'autres éléments tels que les cours d'eau ou les zones urbaines ont provoqué l'arrêt de ravines. Seulement 4 ravines ont été stoppées par des éléments linéaires en Famenne du fait du peu de ravines dans cette région agricole. La proportion de ravines qui prennent fin à cause des haies est plus élevée en Région Jurassique qu'en Région Limoneuse et Condroz / Région Limoneuse.

Tableau 17: Types d'éléments linéaires contrôlant l'arrêt des ravines dans les quatre sites d'étude

Région agricole	Talus	Route	Haie	Autre (Cours d'eau, Zone urbaine...)
Région Limoneuse	62.2%	24.3%	8.1%	5.4%
Famenne	25.0%	50.0%	25.0%	0.0%
Région Jurassique	43.1%	32.3%	23.1%	1.5%
Condroz/Région Limoneuse	30.6%	50.0%	11.1%	8.3%

Le Tableau 18 montre que les talus sont les éléments linéaires du paysage les plus fréquents excepté en Famenne. Les routes sont également très fréquentes en Région Jurassique. La densité de haie est huit fois plus importante en Région Jurassique qu'en Région Limoneuse et quatre fois plus important que dans le Condroz / Région Limoneuse. Les densités de haies sont comparables entre la Famenne et la Région Jurassique.

Tableau 18: Densité des différents éléments linéaires du paysage en bordure de parcelles cultivées dans les quatre sites d'étude

Région agricole	Tous les éléments linéaires	Talus	Routes	Haies	Autre
	Densité d'éléments linéaires [m ha ⁻¹]				
Région Limoneuse	17.9	11.7	3.9	1.0	1.3
Famenne	13.1	3.8	3.0	5.2	1.0
Région Jurassique	30.3	10.5	10.3	7.5	1.9
Condroz/Région Limoneuse	16.0	9.0	4.1	2.1	0.9

Sur les 166 ravines rencontrant un élément linéaire sur leur trajectoire, 3 seulement ont pu le franchir. Les ravines sont donc systématiquement arrêtées par les éléments linéaires du paysage. Au contraire, les fourrières sont peu efficaces pour stopper les ravines car seulement 24% des 128 ravines atteignant une fourrière ont été arrêtées. Aucune relation n'a été trouvée entre le type de culture dans les fourrières et la probabilité d'arrêter une ravine.

3. Discussion

3.1. Points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie

La pente moyenne locale aux points d'arrêt contrôlés par la topographie en Région Limoneuse wallonne ($3,2\% \pm 1,15\%$; Tableau 13) est compatible avec les résultats obtenus pour la Région Limoneuse flamande. En effet, Poesen et al. (1998) et Beuselinck et al. (2000) ont montré que la plupart des points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie se situent sur des pentes <4%. Néanmoins, la pente moyenne locale aux points d'arrêt des ravines varie fortement selon les régions agricoles. Les valeurs sont nettement plus élevées dans les trois autres régions agricoles (Tableau 13). Dans les quatre régions, la pente moyenne locale observée au point d'arrêt des ravines est corrélée avec la pente moyenne des parcelles cultivées (Tableau 2 et Tableau 13). Cela semble indiquer que le dépôt est certainement plutôt contrôlé par des changements de pente (changement dans la capacité de transport des sédiments) plutôt que par des valeurs absolues de pente. Toutefois, selon Vandekerckhove et al. (2000), une relation positive existe pour les contextes méditerranéens, entre la pente au niveau du cône de

déposition de la ravine et la charge caillouteuse en surface à cet endroit. Une relation similaire pourrait s'appliquer à la Wallonie et expliquer en partie les pentes en moyenne plus importantes aux points d'arrêt des ravines contrôlés par topographie en Famenne, en Région Jurassique et en Condroz / Région Limoneuse où la charge caillouteuse en surface est plus élevée qu'en Région Limoneuse.

Tout comme la pente moyenne locale, le seuil de pente critique pour l'arrêt des ravines varie considérablement selon les régions. Le seuil de pente critique est toujours plus grand que la pente moyenne des parcelles cultivées et que la pente de la plupart des pixels ravinés (Figure 26). Par conséquent, la plupart des pixels ravinés sont classés en point d'arrêt des ravines lorsque l'on applique le seuil de pente critique (Tableau 14). Ceci démontre que le seuil de pente critique n'est pas assez restrictif pour identifier avec précision les conditions provoquant le dépôt des ravines. Le recouvrement important entre les distributions des pentes des pixels ravinés sans point d'arrêt et des pixels avec point d'arrêt indique que le critère de pente seul est insuffisant pour discriminer l'érosion par ravinement et le dépôt (Figure 26). Une raison possible de cette mauvaise discrimination basée sur la pente seule peut être l'interaction qui existe entre la pente et l'aire contributive au point d'arrêt des ravines. Lorsque l'aire contributive augmente, la pente nécessaire pour induire le dépôt diminue (Figure 27). Cependant, tout comme le seuil de pente critique, l'utilisation du seuil topographique n'a pas permis une bonne discrimination entre l'érosion par ravinement et le dépôt (Tableau 14). Cela peut être attribué notamment au fait que les seuils topographiques relatifs aux points d'arrêt des ravines ont toujours une position plus élevée que les seuils topographiques pour l'initiation des ravines, à l'exception des aires contributives inférieures à 0,1 ha dans la Région Limoneuse (Figure 27). Cela implique qu'une gamme assez importante de combinaisons de pentes et d'aires contributives peuvent à la fois être sujettes à l'initiation du ravinement et au dépôt des sédiments. Quand un pixel rencontre l'une de ces conditions topographiques, il devient impossible de déterminer si du ravinement ou du dépôt se produit. Le même constat peut être fait lors de l'analyse des seuils topographiques pour l'initiation et l'arrêt des ravines définis par Nachtergaele et al. (2001) et Vandekerckhove et al. (2000). Notons cependant que, pour la présente étude, les positions relatives des seuils topographiques pour l'initiation et l'arrêt des ravines sont difficiles à comparer parce qu'elles dépendent en partie du nombre de données utilisées pour la régression quantile, comme démontré dans la section relative à l'analyse des seuils topographiques. En effet, plus le jeu de données est petit, plus la position du seuil topographique pour l'initiation (arrêt) des ravines est haut (bas).

L'approche probabiliste proposée n'est également pas pertinente pour prédire les points d'arrêt des ravines contrôlés par la topographie (Equations 2 et 3 ; Figure 28). Ceci s'explique notamment par le fait qu'il n'y a pas de différences significatives dans les distributions des facteurs topographiques des pixels ravinés sans point d'arrêt et des pixels présentant un point d'arrêt (Figure 29 et Figure 30). Des facteurs autres que la topographie peuvent avoir contribué à mettre fin aux ravines. Le sens du travail du sol pourrait être l'un de ces facteurs. En effet, si le sens de travail du sol est opposé à la direction de la ravine, on s'attend à ce que cela induise une augmentation de la rugosité hydraulique pouvant conduire au dépôt de la ravine.

3.2. Points d'arrêt des ravines contrôlés par la végétation

Le Tableau 16 et la Figure 32 montre que les transitions de végétation vers des cultures d'hiver, des prairies et des bandes enherbées ont une grande probabilité d'arrêter les ravines. Ceci est en accord avec Beuselinck et al. (2000), qui montrent que ce type de végétation agit comme une véritable barrière pouvant provoquer le dépôt des ravines sur des pentes importantes en raison d'une augmentation à la fois de la résistance du sol au détachement et de la rugosité hydraulique. Au contraire, une succession de cultures de printemps le long de la trajectoire de la ravine permet la propagation de la ravine si les variations topographiques telle que la diminution de la pente ou l'élargissement de la section d'écoulement n'affectent pas la capacité de transport. Ceci s'explique notamment par la faible densité de végétation de la plupart des cultures de printemps au printemps et au début de l'été, lorsque la plupart des ravines se forment (Verstraeten et al., 2006). Certaines de ces cultures (maïs, pomme de terre) sont également caractérisées par des rangs avec un fort espacement qui offrent des conditions favorables au ravinement. Pour ces raisons, seuls quelques points d'arrêt contrôlés par la végétation sont dus à des cultures de printemps (Tableau 15), même si ces cultures sont présentes sur près de la moitié des champs cultivés dans les zones 1 à 3 et plus de 34% dans le Condroz / Région Limoneuse (Tableau 2).

3.3. Points d'arrêt des ravines contrôlés par des éléments linéaires et des fourrières

En Région Jurassique, environ 15% des points d'arrêt des ravines sont liés à des routes, alors que cela représente moins de 5% des cas dans les autres régions (Tableaux 12 et 18). Cette situation peut être attribuée à la forte densité du réseau routier en Région Jurassique (Tableau 19). Des dommages importants aux routes liés à l'arrêt des ravines sont donc à prévoir dans cette région. La plus grande densité de haies en Région Jurassique entraîne une proportion de points d'arrêt causés par les haies presque deux et trois fois plus élevée qu'en Condroz / Région Limoneuse et Région Limoneuse respectivement (Tableaux 18 et 19). La plus grande densité de haies en Région Jurassique est en lien avec la structure du paysage caractéristique d'un bocage, alors que la Région Limoneuse et le Condroz / Région Limoneuse sont des openfield. En Région Limoneuse, la forte densité de talus associés à des parcelles en culture (Tableau 19) explique la forte proportion de ravines stoppées par ce type d'élément linéaire (Tableau 18).

D'une manière générale, les éléments linéaires du paysage sont très efficaces pour stopper les ravines puisque seulement 2% de toutes les ravines atteignant un tel obstacle parviennent à le traverser. Les talus et les haies devraient donc être intégrés aux programmes de gestion des bassins versants agricoles pour protéger les sites vulnérables en aval tels que les routes ou les zones urbaines contre les inondations boueuses provoquées par des ravines. Les fourrières sont quant à elles peu efficaces pour stopper les ravines bien que souvent perpendiculaires à la direction de la ravine.

3.4. Variabilité régionale des principaux facteurs contrôlant l'arrêt des ravines

L'arrêt des ravines est plus souvent contrôlé par un changement de végétation ou par des éléments linéaires du paysage associés à des parcelles cultivées que par la topographie (Tableau 12). Ceci est particulièrement vrai lorsque la taille moyenne des parcelles est petite, car cela augmente la probabilité qu'une ravine atteigne une limite de parcelle avant de rencontrer les conditions topographiques causant son dépôt (Figure 25). Cela explique pourquoi moins de points d'arrêt de ravines sont contrôlés par la topographie en Région Jurassique par rapport aux trois autres sites d'étude (Tableau 12). La proportion de ravines stoppées par des éléments linéaires est 3 à 4 fois plus élevée en Région Jurassique que dans les autres zones agricoles en raison également d'une plus grande densité d'éléments linéaires associés aux parcelles cultivées (Tableau 19). Ces différences entre la Région Jurassique et les autres régions agricoles sont dues à des différences dans l'organisation spatiale du paysage. La Région Jurassique est caractérisée par un paysage de type bocage, c'est-à-dire de petites parcelles souvent délimitées par des haies. Du fait de la taille limitée des parcelles, on retrouve aussi plus de routes secondaires pour accéder aux champs. En outre, les parcelles sont principalement des prairies qui sont efficaces pour stopper les ravines (Tableau 17). Les ravines dans ce type de paysage sont plus courtes que dans les paysages d'openfield tels que la Région Limoneuse (voir la section sur les caractéristiques et la variabilité spatio-temporelle des ravines en Wallonie). Dans cette dernière, l'intensification agricole a abouti à un agrandissement des parcelles, à la disparition quasi-totale des haies et à une plus grande proportion de cultures de printemps par rapport à la surface en prairie. Ce type de paysage favorise donc le ravinement et diminue également la probabilité qu'une ravine soit arrêtée par des éléments linéaires. Il en résulte donc des ravines plus longues, traversant plusieurs parcelles, transportant plus de sédiments et d'eau, et qui ont une plus grande probabilité d'atteindre un site vulnérable. Par conséquent, l'impact du ravinement sur la connectivité hydrologique des bassins versants agricoles est plus élevée dans les paysages d'openfield que dans des paysages de type bocage.

4. Conclusions

Quatre principaux facteurs contrôlant la fin des ravines ont été identifiés: la topographie, la végétation, les éléments linéaires du paysage et les fourrières. Pour les points d'arrêt contrôlés par la topographie, la pente au point de dépôt varie fortement selon les régions agricoles. Ceci résulte probablement de différences régionales dans la charge caillouteuse en surface du sol, mais aussi de différences dans la distribution des pentes entre les régions agricoles. Les seuils de pente critique et topographique ne sont pas suffisamment restrictifs pour identifier avec précision les conditions topographiques provoquant la fin des ravines. L'approche probabiliste incluant la variation de gradient de pente n'a pas non plus conduit à des résultats satisfaisants. D'autres facteurs tels que la direction de travail du sol ont peut-être interféré sur la caractérisation des conditions topographiques provoquant l'arrêt des ravines.

Les cultures d'hiver, les prairies et les bandes enherbées sont particulièrement efficaces pour stopper les ravines, tandis que les cultures de printemps sont peu efficaces. Étant donné que les ravines se forment en plus grande proportion dans les cultures de printemps (voir section sur les caractéristiques et la variabilité spatio-temporelle des ravines en Wallonie), la distribution spatiale des cultures dans les bassins versants agricoles joue un rôle important dans l'expansion des ravines. Quelle que soit leur nature, les éléments linéaires du paysage sont très efficaces pour stopper le développement des ravines. Il s'agit principalement de routes ou de talus. Néanmoins dans les paysages de type bocage caractérisés par une forte densité de haies, ces dernières jouent également un rôle important dans l'arrêt des ravines. Les fourrières ne constituent quant à elles pas un réel obstacle au développement des ravines.

D'importantes différences existent entre les régions agricoles en termes de facteur à l'origine de l'arrêt des ravines. Ces différences régionales sont en grande partie due à des différences dans l'organisation spatiale du paysage (taille moyenne des parcelles, surface en prairie, densité des éléments linéaires). La préservation des talus et la plantation de haies basses devraient être encouragées dans les paysages de type openfield afin de limiter la longueur des ravines et de réduire la connectivité hydrologique et le risque de dommages causés par les inondations boueuses. Dans les paysages de type bocage, les haies doivent être préservées afin de ne pas accentuer le problème du ravinement.

Évaluation de la performance d'indicateurs hydrauliques et topographiques pour la prédiction du ravinement temporaire

Compte tenu des dégâts considérables causés sur site et hors site par le ravinement temporaire, des techniques d'atténuation doivent être mises en œuvre dans les zones sensibles à ce type de phénomène. Les techniques actuelles d'atténuation reposent sur la diminution de la production de ruissellement (couverture végétal adaptée, amélioration de la structure du sol ...), le ralentissement de l'écoulement concentré ou l'augmentation de la résistance du sol au détachement via des chenaux enherbés, des semis de céréales en double densité ou des fascines. Toutefois, afin de cibler les mesures à mettre en place dans les zones les plus critiques et de maximiser le retour sur investissement, il est nécessaire de développer des outils capables de prédire le risque de ravinement, c'est-à-dire de prédire là où la ravine s'initie mais aussi sa trajectoire (p.ex., Eustace et al., 2011).

Les ravines se forment le long des axes de concentration du ruissellement lorsque la force de traction pour l'entraînement des particules et leur transport dépasse un certain seuil (Horton, 1945). Plusieurs méthodes ont été proposées pour évaluer quand ce seuil critique est dépassé. Il s'agit d'indices topographiques, de modélisation physique des processus d'érosion par ravinement ou d'approches statistiques multivariées empiriques. Le principal inconvénient des approches statistiques empiriques (p.ex., Gutierrez et al., 2009; Eustace et al., 2011) est qu'elles fournissent peu d'informations sur les processus en jeu et qu'elles sont propres à chaque site et donc difficilement transposables. Les indices topographiques reposent généralement sur les valeurs de pente et d'aire contributive mais également parfois sur la courbure plane de la section d'écoulement. La combinaison de ces facteurs est censée être proportionnelle à la puissance du flux (p.ex., Thorne et al., 1986). Des résultats satisfaisants ont été obtenus en utilisant cette méthode pour prévoir la localisation des ravines pour de petits bassins versants agricoles allant de 7,5 ha à 252 ha (Moore et al., 1988; Desmet et al., 1999; Jetten et al., 2006, Momm et al., 2012). L'utilisation des indices topographiques est très intéressante car ces derniers sont peu exigeants en termes de temps de calcul. Toutefois, ils ne prennent pas en compte d'autres facteurs qui jouent un rôle important lors de la formation des ravines comme la pluie ou l'occupation du sol (p.ex., Poesen et al., 2011).

Les modèles physiques constituent une alternative intéressante pour prédire l'emplacement des ravines car ils permettent de mieux comprendre les processus réels en jeu mais surtout parce qu'ils peuvent être plus facilement transposable d'un contexte à l'autre. Selon Bryan (2000) et Knapen et al. (2007), de nombreux indices hydrauliques simples sont directement liés à la force de traction critique provoquant le détachement du sol. Il s'agit entre autres de la hauteur de la lame d'eau ruisselée, du débit de pointe, de la vitesse d'écoulement, de la contrainte de

cisaillement, de la contrainte de cisaillement effective, de la puissance du flux ou encore de la puissance unitaire du flux. Knapen et al. (2007) recommandent l'utilisation de tels paramètres hydrauliques simples pour des applications pratiques en raison de leur simplicité et soulignent que la puissance du flux, la contrainte de cisaillement et le débit de pointe sont des indicateurs pertinents pour prédire le détachement du sol par ruissellement concentré. Bryan (2000) montre que la vitesse d'écoulement et la puissance unitaire du flux sont également des indicateurs hydrauliques utiles pour la prédiction du détachement du sol par ruissellement concentré. L'objectif de cette section est de tester la performance d'indicateurs hydrauliques et topographiques couramment utilisés pour prédire le détachement du sol, pour leur capacité à prédire le ravinement temporaire en milieu agricole.

1. Matériel et méthodes

1.2. Site d'étude et base de données ravines.

Pour mettre au point le modèle de prévision du ravinement, il est nécessaire de disposer d'une base de données de ravines fiables qui servira à la calibration et à la validation du modèle. Il a donc été décidé d'utiliser la base de données de ravines constituées dans le cadre de l'évaluation de la subjectivité des opérateurs (base de données n°3, Tableau 1). Pour rappel, il avait été demandé à 11 opérateurs de digitaliser et de classer les ravines pour une zone située en Région Limoneuse (zone n°5, Figure 1). Cette base de données permet d'associer à chaque ravine un niveau de fiabilité selon le nombre d'opérateurs l'ayant identifiée.

La superficie totale de la zone d'étude choisie est de 5235 ha avec une grande superficie de terres arables (4703 ha), dont la plupart sont des terres cultivées (3875 ha ; Tableau 2). Les principales cultures au moment de l'acquisition des photographies aériennes en 2006 étaient des cultures de printemps (betterave, pomme de terre, maïs ...). Parmi les ravines identifiées par 11 opérateurs, seules celles identifiées par au moins 6 opérateurs et situées sur un axe de concentration du ruissellement bien défini, à savoir un vallon sec, ont été retenues. Les ravines présentant de fortes interférences avec des artefacts anthropiques (routes, talus, fossés, traces de roues ...) ont été exclues. En outre, les ravines situés sur un axe de concentration du ruissellement bien défini et dont l'aire contributive était traversée par une route ont également été rejetées. Les routes ont été identifiées via l'inventaire Navstreets qui recense toutes les routes de Wallonie portant un nom.

Pour les ravines identifiées par au moins 6 opérateurs, une ravine unique a été définie comme étant le centre de gravité des lignes résultant de la numérisation des différents opérateurs. Au regard des processus de formation des ravines et du sens physique des indicateurs topographiques et hydrauliques, seules les ravines de printemps ont été retenues. Les ravines situées en culture d'hiver ont été rejetées car elles résultent généralement d'un processus d'érosion lent et progressif lié à des pluies modérées successives sur des sols humides et encroûtés (Nachtergaele et al., 2001). Les ravines de printemps résultent quant à elles

majoritairement d'un seul événement pluvieux intense qui induit un flux intense sur des sols avec une faible couverture végétale. Un total de 68 ravines était donc disponible pour tester les différents indicateurs.

1.2. Données utilisées

Des données topographiques, pédologiques, d'occupation du sol et de précipitations ont été nécessaires pour calculer les indicateurs topographiques et hydrauliques. Les pentes et les aires contributives ont été calculées à partir MNT 10 m de résolution par Demarcin et al. (2009). La carte du parcellaire agricole mise à jour annuellement a été utilisée pour déterminer le type de culture dans chaque parcelle. Pour les parcelles non-agricoles, la carte d'occupation des sols a été utilisée. Les données pluviométriques proviennent du radar situé à Wideumont (à 100 km de la zone d'étude) et ont été fournies par l'Institut Royal Météorologique (IRM). La grille de données de précipitations a une résolution spatiale de 600 x 600 m² et une résolution temporelle de 5 minutes (Goudenhoofdt et Delobbe, 2009). Plusieurs méthodes ont été utilisées par Goudenhoofdt et Delobbe (2009) pour corriger les données radar. Celles résultant de la méthode de krigeage « with external drift » ont été utilisées parce qu'elles étaient les plus précises au regard de l'erreur quadratique moyenne et de l'erreur absolue moyenne (3,498 mm et 1,485 mm, respectivement).

1.3. Calcul des indices topographiques et hydrauliques

Huit indicateurs de ravinement ont été calculés et spatialisés au sein d'un Système d'Informations Géographiques (ArcGIS®). Deux indicateurs topographiques (indice topographique et aire contributive) et six indicateurs hydrauliques (volume ruisselé, débit de pointe, vitesse d'écoulement, puissance du flux, puissance unitaire du flux et contrainte de cisaillement) ont été calculés pour chaque pixel de 10 m situé en culture de printemps et dont l'aire contributive n'était pas traversée par une route. Les principaux paramètres nécessaires pour calculer les huit indicateurs de ravinement sont présentés au Tableau 19. Les indicateurs ne sont pas calculés pour les pixels avec une aire contributive de moins de 0,1 ha, car il a été démontré précédemment que les ravines ne se forment presque jamais dans ces conditions (cf. la section sur l'analyse du seuil topographique pour l'initiation des ravines).

Pour les indicateurs hydrauliques, il a été supposé que la probabilité de ravinement est la plus grande pour la valeur maximale de l'indicateur de ravinement et que le ravinement est le résultat d'un événement pluvieux unique. La valeur maximale de l'indicateur de ravinement ne survient pas forcément pour l'événement pluvieux maximum mais dépend également d'autres paramètres tels que l'état de développement des cultures en place ou la rugosité du sol qui changent avec le temps. Comme la date de la formation des ravines n'est pas connue, il était nécessaire de déterminer pour chaque pixel les événements pluvieux qui ont eu lieu entre la date de semis, fonction de la culture en place pour le pixel où le calcul est fait, et la date d'acquisition des photographies aériennes. Ensuite, pour chaque pixel, les indicateurs

hydrauliques ont été calculés pour chaque pluie et les valeurs maximales ont été extraites. Les pluies ont été extraites en supposant que six heures de suite sans pluie sont nécessaires pour distinguer deux événements pluvieux différents. Seules les précipitations ≥ 10 mm ont été retenues, qui est un peu moins restrictif que le seuil critique de précipitation de 15 mm pour l'initiation des ravines renseigné par Poesen et al. (2003) sur base de différentes études en Europe.

Tableau 19: Liste des indicateurs d'érosion par ravinement et paramètres requis

	Pluie	Pente au PI ¹	Géométrie de la section d'écoulement	Etat de la culture au PI ¹	Etat d'encroûtement du sol / rugosité au PI ¹	Surface de l'AC ²	Etat des cultures dans l'AC ²	Type de sol dans l'AC ²	Etat d'encroûtement du sol / rugosité dans l'AC ²
Aire contributive	-	-	-	-	-	X	-	-	-
Indice topographique	-	X	-	-	-	X	-	-	-
Volume ruisselé	X	-	-	-	-	X	X	X	X
Débit de pointe	X	-	-	-	-	X	X	X	X
Puissance du flux	X	X	-	-	-	X	X	X	X
Vitesse d'écoulement	X	-	X	X	X	X	X	X	X
Puissance unitaire du flux	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Contrainte du cisaillement	X	X	X	X	X	X	X	X	X

¹PI : Point

d'Incision

²AC : Aire Contributive

1.4. Indicateurs topographiques

Deux indicateurs topographiques ont été testés, à savoir l'aire contributive, dont les valeurs ont été extraites à partir du raster d'accumulation de flux, et l'indice topographique basé sur la combinaison de la pente locale et de l'aire contributive (Equation 4; p.ex., Moore et al., 1988; Desmet et al., 1999):

$$I = S * A^b \quad \text{(Equation 4)}$$

où S est le gradient de pente locale [$m\ m^{-1}$], A est l'aire contributive en amont [ha], b est un exposant [sans dimension]. Desmet et al. (1997) montrent que la prédiction de l'emplacement des ravines temporaires en Région Limoneuse flamande ne varie pas de manière significative lorsque l'on fait varier l'exposant b . Ils recommandent d'utiliser $b = 1$. En outre, dans l'Equation 4 ils remplacent l'aire contributive A par l'aire contributive unitaire A_s [$m^2.m^{-1}$] qui est l'aire contributive par unité de courbe de niveau (contour) (voir Moore et al., 1988) et qui est théoriquement indépendante de la résolution du MNT.

1.5. Volume de ruissellement

Le volume de ruissellement (V_r , [m^3]; Equation 5) pour un pixel donné résulte du produit de la hauteur de la lame d'eau ruisselée (H_r , [mm]) sur l'aire contributive alimentant le pixel (A , [m^2]). La hauteur de la lame d'eau ruisselée a été calculée selon la méthode NRCS du Curve Number (Equation 6).

$$V_r = A * H_r \quad \text{(Equation 5)}$$

$$H_r = \frac{(Pl - \lambda * S_{CN})^2}{(Pl + (1 - \lambda) * S_{CN})} \quad \text{(Equation 6)}$$

où Pl est la hauteur de précipitation [mm], S_{CN} est le potentiel de rétention [mm] et λ est la fraction de S_{CN} liée à l'abstraction initiale. Le potentiel de rétention est un indice de stockage estimé en utilisant l'Equation 7:

$$S_{CN} = \left(\frac{1000}{CN_w} - 10 \right) * 25.4 \quad \text{(Equation 7)}$$

où CN_w est le Curve Number pondéré de l'aire contributive. Il est estimé sur la base du Curve Number (CN) de chaque pixel de l'aire contributive en fonction du stade de développement de la culture et du stade d'encroûtement du sol (Equation 8; Van Oost, 2003).

$$CN = CN_{max} - \left(\frac{C_c}{100} * c_1 \right) + \left(\frac{C_r}{4} * c_2 \right) \quad \text{(Equation 8)}$$

où CN_{max} est le CN maximum dérivé du manuel USDA SCS pour une combinaison d'occupation du sol et de groupe hydrologique de sol selon les pratiques agricoles observé en Wallonie (Tableau 20). Les occupations du sol ont été définies en fonction du parcellaire du SIGEC et de la carte d'occupation du sol. Les groupes hydrologiques de sols ont été extraits de la carte d'infiltrabilité des sols dérivée de la carte numérique des sols par Demarcin et al. (2011). Dans l'Equation 8, C_c est le pourcentage de couverture végétale (Annexe 3), C_r est le stade d'encroûtement du sol (Annexe 4; Le Bissonnais et al., 2005) et c_1 et c_2 sont des coefficients. Les pourcentages de couverture végétale ont été estimés sur base d'un suivi de terrain des principales cultures en Wallonie (GISER 2009-2011; Biolders et al., 2011). Les données relatives à l'encroûtement des sols proviennent d'une étude menée par Evrard et al. (2008) pour les GISER – Caractérisation et prédiction du ravinement - Évaluation de la performance d'indicateurs hydrauliques et topographiques pour la prédiction du ravinement temporaire

principales cultures en Wallonie. Quatre stades d'encroûtement y sont recensés à savoir la structure fragmentaire initiale $C_r = 1$, la modification de l'état fragmentaire initiale et l'apparition de croûtes structurales $C_r = 2$, l'apparition locale de croûtes de dépôt $C_r = 3$, et les croûtes de dépôt continues $C_r = 4$. La valeur de c_1 a été définie comme la différence entre CN_{max} et CN_{min} . Cette dernière est définie comme la valeur minimum de CN pour la combinaison culture-sol utilisée pour déterminer la valeur maximale de CN (Tableau 20). La valeur de c_2 a été fixée de façon à ce que la valeur de CN dans l'Equation 8 soit égale à la valeur de CN d'un sol nu lorsque la couverture végétale est de 0% (CN_{bare} ; Tableau 20). Les valeurs de CN modifiées en fonction du type de culture, du groupe hydrologique du sol et de la période de l'année sont fournies en annexe (Annexes 5 à 8).

Tableau 20: Paramètres utilisés pour ajuster la valeur du CN (Equation 8) en fonction du type de culture, du groupe hydrologique du sol et des pratiques culturales observées en Wallonie.

Type de culture		Groupe hydrologique du sol				Pratiques culturales observées en Wallonie
		A	B	C	D	
Cultures sarclées (betterave, maïs, pomme de terre...)	CN_{max}	72	81	88	91	Culture en ligne droite + éventuellement résidus
	CN_{min}	64	75	82	85	
	CN_{bare}	77	86	91	94	
	C_1	8	6	6	6	
	C_2	5	5	3	3	
	CN_{max}	65	76	84	88	
Céréales (Froment, Escourgeon...)	CN_{min}	60	72	80	84	Culture en ligne droite + éventuellement résidus
	CN_{bare}	77	86	91	94	
	C_1	5	4	4	4	
	C_2	12	10	7	6	
	CN_{max}	72	81	88	91	
Cultures maraîchères	CN_{min}	64	75	82	85	Culture en ligne droite + éventuellement résidus
	CN_{bare}	77	86	91	94	
	C_1	8	6	6	6	
	C_2	5	5	3	3	

L'Equation 6 a été initialement calée pour $\lambda = 0,2$. Cependant Hawkins et Khojeini (2000) ont montré que les valeurs médianes de λ pouvaient varier de 0 à 0,0966 pour 97 petits bassins versants aux Etats-Unis. Cazier et Hawkins (1984) obtiennent une valeur moyenne de λ de 0,0006 pour 109 petits bassins versants aux États-Unis. Hawkins et al. (2009) recommandent une valeur de λ de 0,05. Comme λ semble être dépendant des conditions locales, il est donc nécessaire de le calibrer. Pour cela des données pluie-débit de 3 petits bassins versants agricoles situés en Région Limoneuse ont été utilisés (Ganspoel, GISER I et II; Tableau 21). Seuls les événements pluvieux ≥ 10 mm ont été retenus pour la calibration ($n = 17$). La valeur optimale de λ a été calculée pour chaque événement en inversant l'Equation 6. Une régression linéaire entre les valeurs optimales de λ , la hauteur de pluie (P ; Equation 6), le Curve Number pondéré (CN_w ; Equation 7) et leur interaction a été réalisée. Seuls les facteurs de la régression significatifs à $p = 0,05$ ont été retenus.

Tableau 21 Bassins versants et données pluie-débit utilisées pour la calibration du paramètre λ de la méthode NRCS du Curve Number

Nom	Coordonnées de l'exutoire	Surface [ha]	Type de sol dominant	Nombre de données pluie-débit	Gamme de précipitations [mm]	Gamme des volumes ruisselés [m³]
Ganspoel (Steege et al., 2001; Van Oost et al., 2005)	50°48'N, 4°35'E	110.0	Sol limoneux	9	11 - 61	164 - 6154
GISER I	50°79'N, 4°27'E	4.0	Sol limoneux	2	18 - 18	4 - 14
GISER II	50°80'N, 4°28'E	84.3	Sol limoneux	5	9 - 20	40 - 386

1.6. Débit de pointe

Le débit de pointe (Q_p , [m³ s⁻¹]) a été calculé en utilisant l'Equation 9 en fonction de la procédure de l'hydrogramme unitaire proposé à l'Annexe 16A du manuel NRCS USDA (2004) :

$$Q_p = \frac{9}{8} * \frac{V_r}{t_c} \quad \text{(Equation 9)}$$

où t_c , [s] est le temps de concentration de l'aire contributive calculé en utilisant l'Equation 10.

$$t_c = \frac{\left(\frac{l}{0.305}\right)^{0.8} * (S_{CN} + 1)^{0.7}}{1.140 * Y^{0.5}} \quad \text{(Equation 10)}$$

où l est la plus grande longueur d'écoulement de l'aire contributive [m] et Y est la pente moyenne de l'aire contributive [%].

1.7. Vitesse d'écoulement

La vitesse d'écoulement a été calculée au moyen de l'Equation 11 (V [$m\ s^{-1}$]):

$$V = \frac{Q_p}{A_m} \quad \text{(Equation 11)}$$

où Q_p [m^3] est le débit de pointe défini à l'Equation 9 et A_m [m^2] est la section mouillée des axes de concentration du ruissellement supposés semi-circulaires (Figure 33). La section mouillée est définie en utilisant l'Equation 12:

$$A_m = \frac{r^2 * (\theta - \sin \theta)}{2} \quad \text{(Equation 12)}$$

où le rayon r [m] (Figure 33) est l'inverse de la courbure transversale déterminée sur base MNT en utilisant l'extension DEM Surface Tools®. L'angle θ ([rad], Figure 33) est l'angle au centre de la section transversale d'écoulement formée par chacune des lignes provenant des extrémités de la surface de l'eau et a été calculée en utilisant l'Equation 13:

$$\theta = 2 * a \cos\left(\frac{r-H}{r}\right) \quad \text{(Equation 13)}$$

L'Equation 13 requiert de définir la hauteur d'eau dans la section d'écoulement (H , [m], Figure 33).

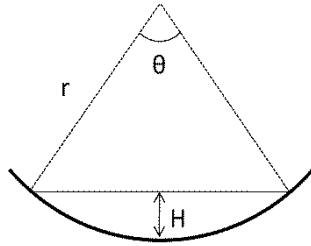


Figure 33: Paramètres de la section d'écoulement semi-circulaire des axes de concentration du ruissellement utilisés dans les Equations 12 et 13.

En inversant l'Equation de Manning (Equation 14) :

$$Q = \frac{1}{n} * \frac{A_m^{5/3}}{P^{2/3}} * S^{1/2} \quad \text{(Equation 14)}$$

où n est le coefficient de Gauckler-Manning et P [m] est le périmètre mouillé défini par l'Equation 15 pour une section semi-circulaire:

$$P = r * \theta \quad \text{(Equation 15)}$$

une relation empirique (Equation 16, Annexe 9) a été dérivée pour estimer la hauteur d'eau :

$$\text{Log}(H) = (0.46 + 10^{-\text{Log}(r)-2.18}) \cdot \text{Log}\left(\frac{Q \cdot (n_b + n_a)}{S^{0.5}}\right) - 0.10 \cdot \text{Ln}(r) - 0.07 \quad (\text{Equation 16})$$

Dans l'Equation 16, S est le gradient de pente [m m^{-1}] et le coefficient Gauckler-Manning n est décomposé comme la somme des effets de la rugosité du sol en fonction de la taille de particules (n_b) et la rugosité due à la végétation, les obstructions et les irrégularités de surface (n_a ; Arcement et Schneider, 2008). La partie de la rugosité fonction de la taille de particules de sol a été déterminée en utilisant l'Equation 17 (Yen, 1991), où d_{50} est le diamètre médian des sédiments exprimé en mètre.

$$n_b = k * d_{50}^p \quad (\text{Equation 17})$$

Pour un sol limoneux, $p = 1/6$, $k = 0,0474$, et $d_{50} = 26 \mu\text{m}$, donnant environ $n_b = 0,01$. n_a est la somme des effets de la rugosité du sol (n_s) et de la rugosité due à la végétation (n_v). La valeur maximale de n_s (0,01) a été définie comme la différence entre les coefficients de Gauckler Manning dans des conditions normales pour un sol nu ($n = 0,02$; Te Chow, 1959) et n_b . n_s varie progressivement entre 0 et la valeur maximale (0,01) selon le stade d'encroûtement du sol (C_r ; Equation 8 et Annexe 4) en utilisant l'Equation 18.

$$n_s = 0.01 * \frac{4 - C_r}{3} \quad (\text{Equation 18})$$

La valeur maximale de n_v a été définie comme la différence entre le coefficient de Gauckler Manning dans des conditions normales et le coefficient de Gauckler Manning pour un sol nu. On a supposé que le développement des racines ou des tiges qui peuvent affecter la rugosité due à la végétation était proportionnelle au pourcentage de couverture végétale (C_c ; Equation 8 et Annexe 5). n_v varie progressivement entre 0 et la valeur maximale ($n_{\max} = 0.015$ pour les cultures sarclées et $n_{\max} = 0.02$ pour les autres cultures) en fonction du pourcentage de couverture végétale (Annexe 4) en utilisant l'Equation 19.

$$n_v = n_{\max} * \frac{C_c}{100} \quad (\text{Equation 19})$$

1.8. Puissance (unitaire) du flux

La puissance du flux Ω [W m^{-2}] a été calculée en utilisant l'Equation 20:

$$\Omega = \gamma * Q * S \quad (\text{Equation 20})$$

où γ est le poids spécifique de l'eau [N m^{-3}]. La puissance unitaire du flux U [m s^{-1}] a été calculée selon Yang (1977) comme le produit de la vitesse d'écoulement et le gradient de pente (Equation 2.21).

$$U = V * S \quad (\text{Equation 21})$$

1.9. Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement totale liée à l'écoulement (τ , [N m⁻²]) a été calculée suivant l'Equation 22 (p.ex., Nearing et al., 1997):

$$\tau = \gamma * H * S \quad (\text{Equation 22})$$

La contrainte de cisaillement qui agit effectivement sur le sol τ_s est une fraction de la contrainte de cisaillement totale τ du fait des effets de la végétation et des autres irrégularités de surface (Flanagan et Nearing, 1995). Tiscareno-Lopez et al. (1994) montrent que τ_s peut être estimée par l'Equation 23.

$$\tau_s = \gamma * H * S * \left(\frac{n_b}{n_b + n_a} \right)^{1.5} \quad (\text{Equation 23})$$

1.10. Evaluation de la capacité des indicateurs topographiques et hydrauliques à prédire le ravinement temporaire

La zone d'étude a été divisée en 14 zones correspondant aux emprises des photographies aériennes. Trois zones ont été utilisées pour comparer les performances des indicateurs topographiques et hydrauliques (zones n° 3, n° 8 et n° 12, Figure 34) et calibrer le meilleur indicateur. Vingt-deux ravines étaient disponibles au sein de ces trois zones. De légères différences ont été observées entre les ravines uniques définies comme le centre de gravité des lignes numérisées par les différents opérateurs et l'axe de concentration du ruissellement identifié par le MNT. Cela est dû à la fois à la qualité de la numérisation des ravines mais également à la résolution du MNT et du positionnement relatif du MNT et des photographies aériennes. Pour chaque pixel raviné, la valeur la plus élevée de chacun des indicateurs a donc également été recherchée dans les 8 pixels voisins. Pour les pixels non ravinés, les valeurs des indicateurs ont été extraites à l'emplacement du pixel si la valeur n'avait pas déjà été attribuée à un pixel raviné. Dans le cas contraire, la valeur initiale de l'indicateur du pixel raviné a été attribuée au pixel non raviné. Les valeurs des indicateurs topographiques et hydrauliques ont donc été déterminées pour chaque pixel raviné ou non.

On suppose que la probabilité d'occurrence du ravinement augmente lorsque la valeur de l'indicateur augmente. Dans une situation idéale, une valeur seuil spécifique à chacun des indicateurs devrait permettre de discriminer parfaitement les pixels ravinés et non ravinés. Toutefois, on s'attend à ce que les distributions des valeurs des différents indicateurs entre pixels ravinés et non ravinés se chevauchent. Dans ce cas, définir une valeur seuil au-delà de laquelle le ravinement se produit conduit à prédire des pixels non ravinés comme ravinés et vice-versa.

Pour déterminer le nombre de pixels correctement prédits ou non pour une valeur seuil donnée, une matrice de confusion peut être créée (Tableau 22).

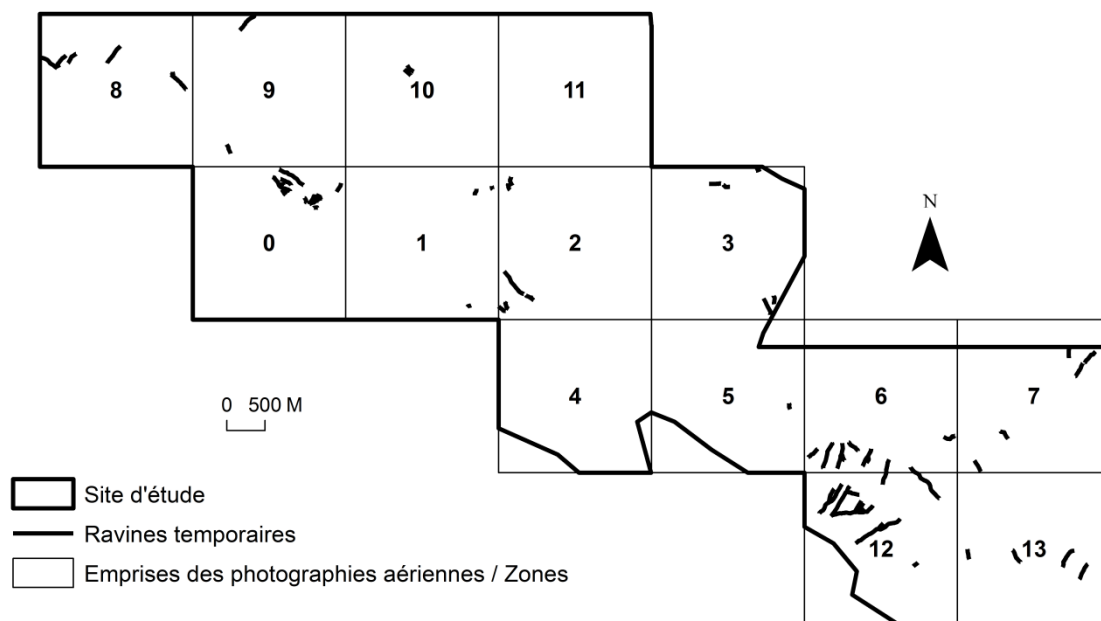


Figure 34: La zone d'étude divisée en 14 zones selon l'emprise photographies aériennes. Les zones n° 3, n° 8 et n°12 ont été utilisées pour comparer les indicateurs topographiques et hydrauliques. Les zones restantes ont ensuite été utilisées pour la validation de l'indicateur le plus pertinent.

Tableau 22: Matrice de confusion permettant de comparer, pour une valeur de seuil à partir duquel le ravinement est attendu, le nombre de pixels prédits comme ravinés et non ravinés aux pixels effectivement ravinés et non ravinés

	Observé "raviné"	Observé "non raviné"
Prédit "raviné"	<i>c</i>	<i>d</i>
Prédit "non raviné"	<i>e</i>	<i>f</i>

Une telle matrice de confusion peut être caractérisée par sa sensibilité et sa spécificité. La sensibilité est le taux de vrais positifs, à savoir la proportion de pixels ravinés correctement prédits (Equation 24).

$$\text{Sensibilité} = \frac{c}{c+e} \quad \text{(Equation 24)}$$

où *c* et *e* sont définis au Tableau 22. La spécificité est le taux de vrais négatifs, c'est-à-dire la proportion de pixels non ravinés correctement prédits (Equation 25).

$$Specificit\acute{e} = \frac{f}{d + f}$$

(Equation 25)

où f et d sont définis au Tableau 22. En traçant le taux de vrais positifs (sensibilité) par rapport au taux de faux négatifs ($= 1 - \text{spécificité}$) pour chaque valeur seuil allant de la valeur minimale à la valeur maximale de l'indicateur, il est possible de dessiner les courbes ROC (Figure 35; Spitalnic, 2004). Cette courbe permet de visualiser la performance de l'indicateur. L'indicateur fournissant la courbe ROC avec la position la plus haute est le meilleur et sa performance peut être caractérisée par le calcul de l'aire sous la courbe (AUC) allant de 0,5 à 1. Si $AUC = 0,5$, l'indicateur ne permet pas de discriminer les pixels non ravinés des pixels ravinés. Si $AUC \geq 0,9$ l'indicateur est excellent, car il est capable de discriminer presque la totalité des pixels ravinés des pixels non ravinés. Entre ces deux situations, l'indicateur peut être qualifié de bon, passable, médiocre et mauvais pour respectivement $0,8 \leq AUC < 0,9$, $0,7 \leq AUC < 0,8$, $0,6 \leq AUC < 0,7$ et $0,5 \leq AUC < 0,6$.

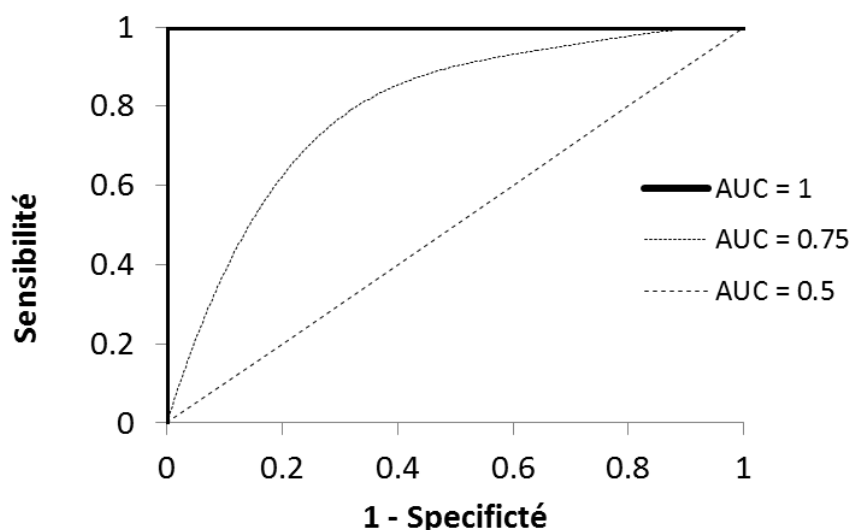


Figure 35: Exemples de courbes ROC. Ligne en gras: courbe ROC parfaite ($AUC = 1$), tous les points positifs peuvent être séparés des négatifs. Ligne tiretée: pas de discrimination entre positifs et négatifs ($AUC = 0,5$). Les courbes ROC peuvent varier entre ces deux situations extrêmes, comme la ligne pointillée ($AUC = 0,75$).

1.11. Calibration et validation du meilleur indicateur de ravinement

La calibration du meilleur indicateur de ravinement, identifié sur base des courbes ROC, consiste à définir la valeur de seuil permettant la meilleure discrimination entre les pixels ravinés et non ravinés. Cette valeur seuil correspond à la valeur de l'indicateur qui maximise simultanément la sensibilité et la spécificité (Equation 24 et 25). Elle correspond à la valeur de l'indicateur excluant le plus de pixels non ravinés sans manquer un nombre acceptable de pixels ravinés. Cette valeur seuil peut être déterminée en reportant dans un graphique les valeurs de sensibilité et de spécificité pour chaque valeur de l'indicateur et en définissant l'intersection des deux courbes résultantes (Figure 36).

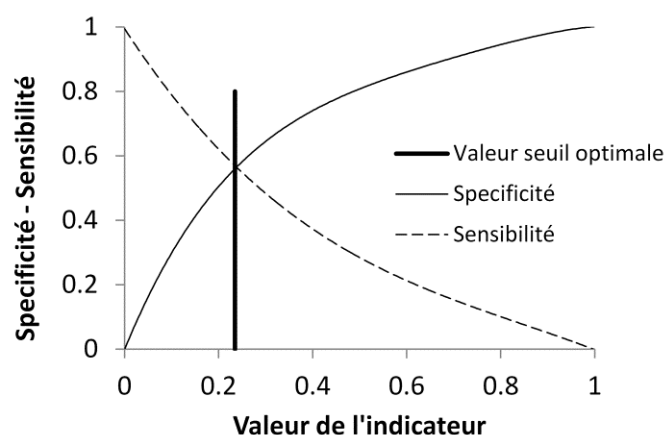


Figure 36: Valeur seuil optimale de l'indicateur pour faire la distinction entre pixels ravinés et non ravinés

La probabilité d'occurrence du ravinement peut être alors définie comme le rapport entre le nombre de pixels ravinés observés au-delà de la valeur seuil et le nombre total de pixels dont la valeur de l'indicateur est également supérieure à la valeur seuil. Il est possible d'affiner la discrimination entre les pixels ravinés et non ravinés en définissant une seconde valeur seuil qui maximise simultanément la sensibilité et la spécificité pour les valeurs de l'indicateur allant de la première valeur seuil à la valeur maximale de l'indicateur. Le second seuil est pertinent si la probabilité d'occurrence de ravinement qui en découle est plus élevée que celle définie en se basant simplement sur la première valeur seuil. Cette procédure peut être répétée jusqu'à une valeur seuil au-delà de laquelle la probabilité d'occurrence du ravinement n'augmente plus. Cela conduit à définir plusieurs classes de valeurs d'indicateurs dont les limites correspondent aux valeurs seuil. A chaque classe de valeurs d'indicateur est associée une probabilité spécifique d'occurrence du ravinement. Ces classes ont ensuite été validées en utilisant les quarante-six ravines réparties dans les 11 zones restantes du site d'étude (Figure 34). Dans cette zone de validation, le meilleur indicateur de ravinement a été calculé pour chaque pixel raviné et non raviné. La probabilité d'occurrence du ravinement a ensuite été déterminée pour chaque catégorie de valeurs d'indicateurs définie au cours de l'étape de calibration.

2. Résultats

2.1. Calibration du paramètre λ de la méthode NRCS du Curve Number

Les valeurs optimales de λ pour les 17 événements pluvieux provenant des 3 micro-bassins versants ainsi que les Curve Number pondérés des aires contributives liés à l'occupation du sol, au stade végétatif des différentes cultures et à l'encroûtement du sol sont présentés au Tableau 23. L'analyse des données montre une corrélation entre la valeur optimale de λ (Equation 6), la hauteur de pluie (PI) et le Curve Number pondéré de l'aire contributive (CN_w)

qui peut s'exprimer par l'Equation 26 ($R^2 = 0,76$, Nash coefficient Sutcliff = 0,77, RMSE = 0,025, n = 17).

Tableau 23: Caractéristiques des 17 événements retenues pour la calibration de la méthode NRCS du Curve Number, CN pondéré des bassins versants et détermination du λ optimal

BV	Date	PI [mm]	Volume total à l'exutoire [l]	Lame d'eau moyenne ruisselée [mm]	CN pondéré	λ optimal
GISER_amont	5/10/2012	17.8	14262	0.357	74.48	0.138
	06/07/2011	17.9	4098	0.102	75.34	0.179
GISER_inter	29/01/2013	17.2	385958	0.458	78.92	0.168
	30/01/2013	11.0	228577	0.271	78.92	0.097
	01/02/2013	12.3	294763	0.349	79.24	0.110
	7/02/2013	19.6	147382	0.175	79.24	0.242
	27/07/2013	15.7	39953	0.047	76.06	0.171
	28/07/2013	10.0	215961	0.256	76.06	0.064
Ganspoel	11/07/1997	13.0	2306670	2.076	70.91	0.000
	17/07/1997	21.5	404113	0.364	70.91	0.145
	28/04/1998	11.0	163565	0.147	72.76	0.076
	8/09/1998	24.5	530202	0.477	68.11	0.141
	13/09/1998	60.5	10589656	9.532	68.12	0.183
	31/10/1998	25.0	1957653	1.762	67.62	0.078
	14/11/1998	15.5	833684	0.750	70.02	0.056
	29/11/1998	18.5	679238	0.611	70.02	0.092
	16/01/1999	16.0	1100920	0.991	70.01	0.047

$$\lambda = -0.01527 - 0.04806 * PI + 0.0007609 * PI * CN \quad \text{(Equation 26)}$$

La Figure 37 montre la relation entre les volumes de ruissellement observés à la sortie des 3 petits bassins versants utilisés pour calibration pour des événements pluvieux > 10 mm et ceux simulés sur base de l'estimation de λ en utilisant l'Equation 26. Les coefficients de corrélation et de Nash-Sutcliffe sont respectivement de 0,93 et 0,94, et l'erreur moyenne est de 570 m³.

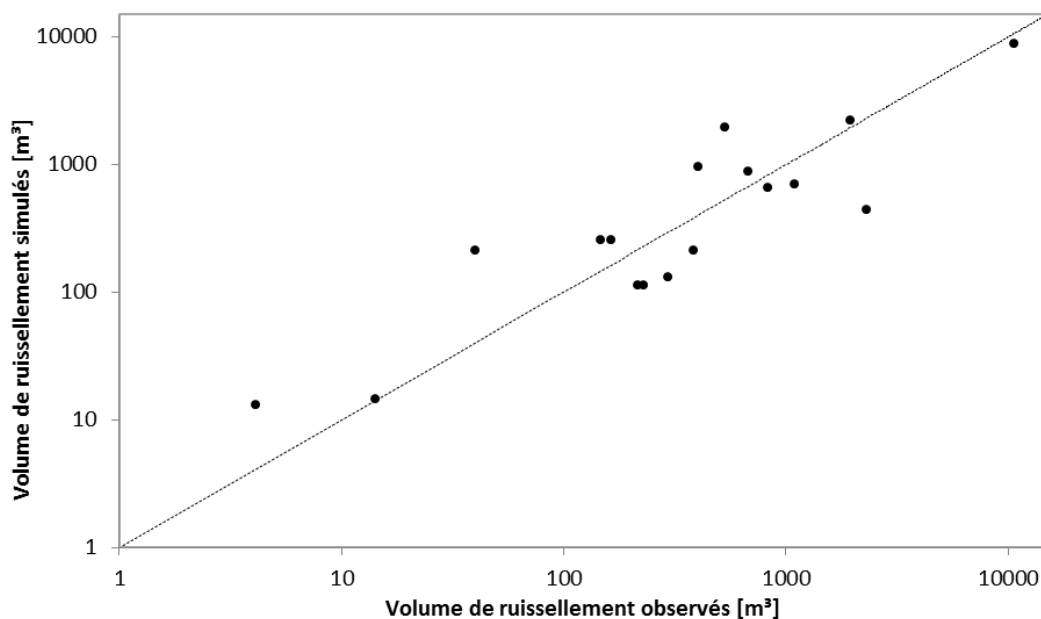


Figure 37 : Relation entre les volumes de ruissellement observés et ceux calculés sur base de la méthode NRCS du Curve Number avec λ estimé à l'aide de l'Equation 26. La ligne pointillée correspond à la droite 1: 1.

2.2. Evaluation de la capacité des indicateurs topographiques et hydrauliques à prédire le ravinement temporaire

Tous les indicateurs topographiques et hydrauliques ont été normalisés entre 0 à 1 pour faciliter leur comparaison (Figure 38 et Annexes 10 et 11). La tendance générale de la distribution spatiale des valeurs les plus élevées et des valeurs les plus faibles pour la puissance unitaire du flux, la vitesse d'écoulement et la contrainte de cisaillement est différente de celle des autres indicateurs (Figure 38F à H). Ceci s'explique principalement parce qu'il n'a pas été possible de calculer ces 3 indicateurs pour environ 30% des pixels. En effet, la courbure à l'endroit de ces pixels a été évaluée comme étant légèrement convexe par l'extension DEM Surface Tools®. A l'exception de la puissance unitaire du flux (p.ex. Figure 38H), les valeurs les plus élevées des indicateurs topographiques et hydrauliques correspondent aux principaux axes de concentration du ruissellement. L'analyse des courbes ROC montre que la puissance unitaire du flux n'est pas un bon indicateur car sa courbe ROC est proche de la droite 1:1 (AUC = 0,569; Figure 39). L'utilisation de la puissance unitaire du flux revient donc presque à classer de manière aléatoire les pixels comme ravinés ou non ravinés. Les AUC de la contrainte de cisaillement et de la vitesse d'écoulement sont similaires. Ces deux indicateurs conduisent à une mauvaise discrimination entre les pixels ravinés et non ravinés (AUC < 0,7). La puissance du flux et l'indice topographique donnent des résultats acceptables (respectivement AUC = 0,756 et 0,782). Les courbes ROC relatives au débit de pointe, au volume de ruissellement et à l'aire contributive occupent alternativement la position la plus haute. Le volume de ruissellement présente l'AUC la plus élevée (0,813) et a donc été désigné comme le meilleur indicateur.



Figure 38: Indicateurs topographiques et hydrauliques rééchelonnés de 0 à 1 dans la zone n ° 12 (Figure 34).

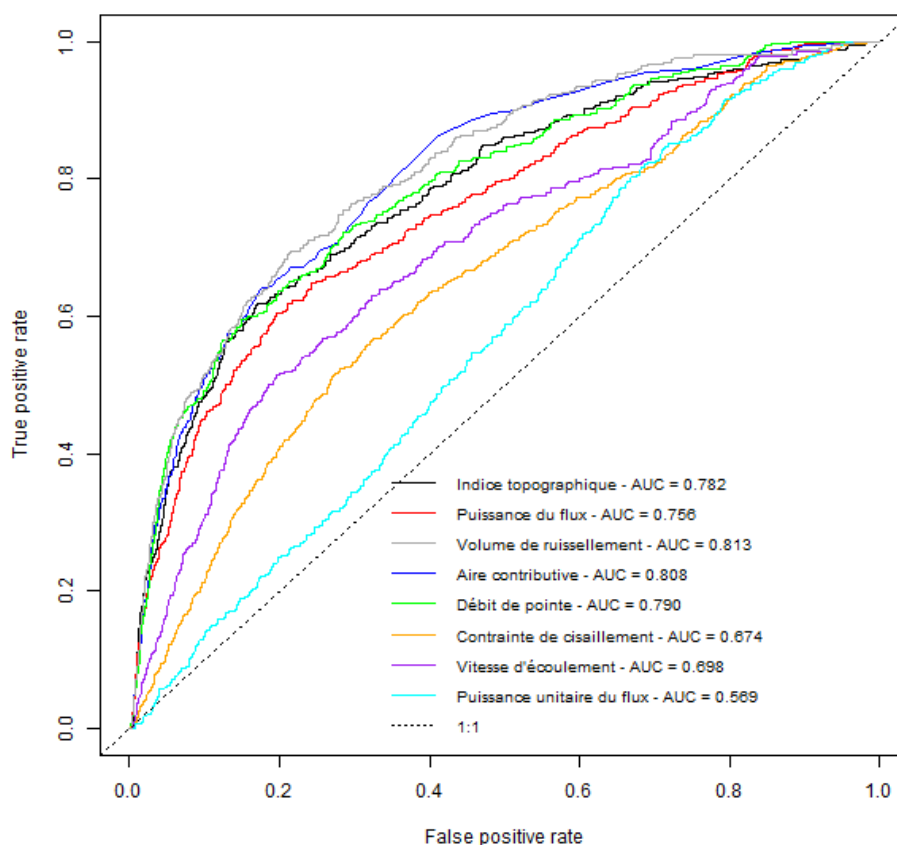


Figure 39: Courbes ROC et valeurs de l'AUC des indicateurs topographiques et hydrauliques

2.3. Calibration et validation du meilleur indicateur de ravinement

2.3.1. Calibration

Les valeurs les plus élevées de volume de ruissellement dans la zone de calibration ne correspondent pas toujours aux pixels ravinés et vice-versa (Figure 40). Ceci est notamment dû à un chevauchement important entre la distribution des valeurs de volume de ruissellement pour les pixels ravinés et non ravinés (Figure 41). Toutefois, de 500 m³ à 2500 m³ la densité de pixels ravinés est supérieure à celle des pixels non ravinés. Aucun pixel raviné n'est associé à un volume de ruissellement > 4000 m³. La probabilité d'occurrence du ravinement pour de tels volumes a donc été fixée à 0.

La méthode de seuillage par étape basée sur la maximisation simultanée de la sensibilité et de la spécificité a conduit à identifier quatre valeurs seuils (Tableau 24). Ceci a permis de définir cinq classes de volume de ruissellement avec des probabilités d'occurrence spécifiques de ravinement temporaire (Tableau 25). A partir de 291 m³, la probabilité d'occurrence du ravinement est supérieure à 25%. L'AUC de la courbe ROC associée avec les volumes de ruissellement allant de 291 m³ à 4000 m³ est de 0,679. La plus forte probabilité d'occurrence du ravinement temporaire est de 34% et est associé à des volumes de ruissellement allant de 561 m³ à 4000 m³. Moins de 20% du nombre total des pixels ravinés est associé à cette gamme de

GISER – Caractérisation et prédiction du ravinement - Évaluation de la performance d'indicateurs hydrauliques et topographiques pour la prédiction du ravinement temporaire

volumes de ruissellement. L'AUC de la courbe ROC correspondante est de 0,571. Les endroits où les volumes de ruissellement sont compris entre 0 et 124 m³ ont une faible probabilité d'être ravinés ($\leq 5,1\%$). Cependant, 58% des pixels ravinés observés sont associés à des volumes de ruissellement <124 m³.



Figure 40 : Volumes de ruissellement simulés et ravines temporaires observées dans la zone de calibration (zones A) # 3, B) # 8 et C) # 12; Figure 34).

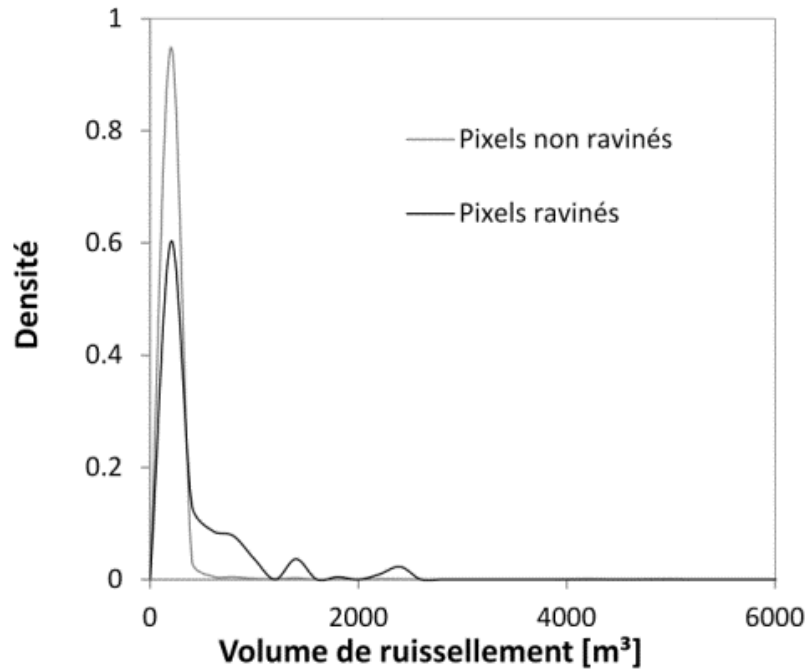


Figure 41: Distributions du volume de ruissellement pour les pixels ravinés et non ravinés dans la zone de calibration (zones n ° 3, n ° 8 et n°12; Figure 34).

Tableau 24 Valeurs seuils et AUC des courbes ROC connexes.

Volume de ruissellement [m³]	AUC	Valeur seuil
0 - 4000	0.815	45
45 - 4000	0.741	124
124 - 4000	0.679	291
291 - 4000	0.571	561

Tableau 25: Probabilité d'occurrence du ravinement en fonction du volume de ruissellement dans la zone de calibration.

Volume de ruissellement [m³]	Nombre de pixels	Nombre de pixels ravinés	Probabilité d'occurrence du ravinement [%]
0 - 45	5848	92	1.6%
45 - 124	1537	79	5.1%
124 - 291	499	61	12.2%
291 - 561	185	48	25.9%
561 - 4000	171	58	33.9%
> 4000	25	0	0.0%
<i>Total</i>	8265	338	

2.3.2. Validation

Seul l'indicateur de ravinement basé sur le volume de ruissellement a fait l'objet d'une validation. Comme pour la zone de calibration, les valeurs les plus élevées de volume de ruissellement dans la zone de validation ne correspondent pas toujours aux pixels ravinés, et vice-versa (Figure 42). De même, aucun pixel raviné n'est observé dans la zone de validation pour des volumes de ruissellement > 4000 m³ (Tableau 26). Pour les autres classes de volume de ruissellement, les probabilités d'occurrence du ravinement sont divisées par un facteur de près de 1,5 par rapport à la zone de calibration (Tableau 25). La plus forte probabilité d'occurrence du ravinement temporaire est de 22,6% et concerne 16% des pixels ravinés.



Figure 42 : Volumes de ruissellement simulés et ravines temporaires observées dans 3 compartiments de la zone de validation (zones A) # 2, B) # 13 et C) # 0; Figure 34).

Tableau 26: Probabilité d'occurrence du ravinement dans la zone de validation sur base des classes de volume de ruissellement définies au Tableau 24.

Volume de ruissellement [m³]	Nombre de pixels	Pixels ravinés	Probabilité d'occurrence du ravinement [%]
0 - 45	12677	145	1.1%
45 - 124	3427	112	3.3%
124 - 291	951	70	7.4%
291 - 561	348	57	16.4%
561 - 4000	323	72	22.3%
> 4000	0	0	0.0%
<i>Total</i>	<i>17726</i>	<i>456</i>	

3. Discussion

3.1. Evaluation de la capacité des indicateurs topographiques et hydrauliques à prédire le ravinement temporaire

D'une manière générale, plus l'indicateur est complexe, moins il s'est avéré efficace pour prédire le ravinement temporaire (Tableau 19 et Figure 39). Cela est particulièrement vrai pour la puissance unitaire du flux, la vitesse d'écoulement et la contrainte de cisaillement. Les mauvais résultats de ces indicateurs pourraient en partie s'expliquer par la précision du MNT qui se caractérise par un écart type de 0,2 m pour ce qui est de l'altitude. Ceci introduit des erreurs lors de l'évaluation de la courbure transversale et donc de la hauteur d'eau (Equation 16). En outre, 30% des pixels sont associés à une courbure convexe alors qu'ils sont situés sur des axes d'écoulement, de telle sorte que la hauteur d'eau n'a pas pu être calculée pour ces pixels. Finalement, il a été supposé que le flux se répartissait sur toute la largeur de la section transversale de l'axe de concentration du ruissellement alors qu'en réalité, et dans de nombreux cas, la largeur de l'écoulement peut être inférieure à la largeur de la section transversale de l'axe de concentration du ruissellement. Les hauteurs d'eau simulées ont donc probablement été sous-estimées.

Les meilleurs indicateurs de ravinement sont ceux qui ne prennent pas en compte le gradient de pente locale. Par exemple, l'aire contributive est meilleure que l'indice topographique combinant le gradient de pente locale et l'aire contributive. De même, le débit de pointe donne de meilleurs résultats que la puissance du flux combinant le débit de pointe au gradient de pente locale. Parmi les moins bons indicateurs, la vitesse d'écoulement est le meilleur et ne

prend pas en compte le gradient de pente locale contrairement à la contrainte de cisaillement et la puissance unitaire du flux. Ceci est en accord avec les affirmations de Desmet et al. (1999), qui ont utilisé l'indice topographique pour prédire l'emplacement des ravines et montrent que le gradient de pente locale contrôle souvent le point d'incision des ravines alors que leur trajectoire est principalement contrôlée par l'aire contributive.

Globalement la prise en compte de l'occupation du sol et des précipitations n'améliore pas significativement la prédiction du ravinement lorsque l'on compare les indicateurs hydrauliques aux indicateurs topographiques. Les résultats des meilleurs indicateurs hydrauliques (volume de ruissellement et débit de pointe) sont assez similaires aux indicateurs topographiques (aire contributive et indice topographique) (Figure 38 et Figure 39). Ceci est peut-être dû, dans certains cas, au fait que nous n'avons pas identifié l'événement pluvieux correct qui a initié la ravine. Plus de données de pluie-débit sont également nécessaires pour améliorer la calibration et la validation du modèle qui conduit pour l'instant à une erreur-type affectant les volumes de ruissellement simulé de 530 m³ (Figure 37). La méthode NRCS du Curve Number pourrait également être améliorée. Des paramètres supplémentaires liés à l'humidité du sol et aux caractéristiques des précipitations telles que l'intensité et la distribution devraient être incorporées (Hawkins et al., 2009). En outre, la prévision du ravinement pourrait être améliorée en combinant les indicateurs hydrauliques avec les paramètres critiques du sol qui y sont liés (par exemple, la contrainte de cisaillement par rapport à la contrainte de cisaillement critique ...) en « modèles excédentaires », tel que proposé par Foster (1982). Cependant, cela nécessite par exemple des données de contrainte de cisaillement critique fiables. La capacité de transport de l'écoulement concentré pourrait également être prise en compte pour des résultats plus réalistes.

3.2. Calibration et validation du meilleur indicateur de prédiction du ravinement

La discrimination entre les pixels ravinés et non ravinés en fonction du volume de ruissellement est très difficile en raison d'un chevauchement important entre ces deux distributions (Figure 41). Le volume de ruissellement donne de meilleurs résultats pour identifier les endroits où l'apparition de ravines éphémères n'est pas attendue plutôt que les localisations où elles peuvent apparaître (Tableau 25 et Tableau 26). Ces localisations sont associées à de faibles volumes de ruissellement. Cependant, les localisations identifiées par le volume de ruissellement comme non attendues pour l'apparition de ravines concernent tout de même la plupart des pixels ravinés observés (> 50% des pixels ravinés). Ce déséquilibre entre le pourcentage de pixels ravinés attendus et le nombre absolu de pixels ravinés observés pour les faibles volumes de ruissellement peut être attribué au déséquilibre important entre le nombre de pixels ravinés et non ravinés pour de tels volumes de ruissellement (Figure 41, Tableau 25 et Tableau 26). Le volume de ruissellement n'est pas en mesure d'identifier de manière fiable les zones sujettes à l'apparition de ravinement temporaire puisque les plus fortes probabilités d'occurrence obtenues pour les volumes de ruissellement les plus importants (<4000 m³) ne dépassent pas

34% (Tableau 25 et Tableau 26). De plus, l'AUC des courbes ROC pour les volumes de ruissellement de 291 à 4000 m³ montre que la discrimination n'est pas bonne (Tableau 24).

Les résultats montrent qu'aucun pixel raviné n'est lié à des volumes de ruissellement > 4000 m³. Il existe une forte corrélation entre le volume de ruissellement et l'aire contributive ($r = 0,81$). Les pixels présentant des volumes de ruissellement > 4000 m³ sont donc également caractérisés par de grandes aires contributives (au moins 20 ha). Dans la pratique, il existe une forte probabilité pour que l'écoulement concentré n'atteigne pas de tels pixels situés très en aval sur les axes de concentration du ruissellement. Ceci est lié au fait que l'écoulement à une très grande probabilité d'être intercepté et dévié plus en amont par des éléments linéaires qui ne sont pas mis en évidence par le MNT en raison de sa résolution. Ces éléments linéaires peuvent être des routes secondaires, de petits talus ou des fossés. En outre, les eaux de ruissellement qui suivent des axes de concentration du ruissellement traversant plusieurs parcelles ont également une grande probabilité d'être ralenties suite aux changements de couverture végétale qui peuvent induire une augmentation de la résistance à l'érosion conduisant au dépôt de sédiments. Beuselinck et al. (2000) montre en effet que, au printemps, jusqu'à 28% des dépôts des ravines éphémères sont déclenchés à la frontière entre deux parcelles avec la parcelle aval présentant prairie ou une céréale d'hiver et agissant comme une véritable barrière de végétation.

De récentes études ont souligné l'importance de l'effet des éléments linéaires tels que les routes pour prédire l'emplacement des ravines ou la sensibilité au ravinement (Conoscenti et al., 2014; Dube et al., 2014, Makanzu Imwangana et al., 2014.). Dans la présente étude, seuls les pixels dont l'aire contributive était traversée par une route portant un nom (NavStreets) ont été exclus. Les pixels dont l'aire contributive était traversée par des routes secondaires ont été donc été intégrés. Dans la pratique, l'interception des écoulements en amont par ces petites routes a probablement conduit à prédire des ravines sur des axes de concentration du ruissellement où elles ne peuvent pas se produire et à manquer des ravines formées en raison du feroutage. Enfin, une partie des mauvais résultats fournis par les indicateurs de ravinement pourrait être liée aux divergences entre l'emplacement des ravines numérisées et l'emplacement des axes de concentration du ruissellement lié à la résolution de MNT. Une résolution plus élevée du MNT permettrait en effet d'améliorer le positionnement des axes de concentration du ruissellement, mais aussi de prendre en compte les éléments linéaires. Un tel MNT est en cours d'acquisition en Wallonie. Le sens du travail du sol qui n'est pas pris en compte dans notre modèle peut avoir également un effet non négligeable sur la direction des écoulements (Desmet et al. 1999). Pour finir, des erreurs de numérisation de ravines ou de géoréférencement des photographies aériennes par rapport au MNT ne sont pas à exclure et peuvent affecter également les résultats.

4. Conclusions

Parmi les indicateurs topographiques et hydrauliques testés, ceux qui ne tiennent pas compte du gradient de pente locale fournissent les meilleurs résultats pour prédire l'emplacement des

ravines temporaires. Les résultats liés à la vitesse d'écoulement, à la contrainte de cisaillement et à la puissance unitaire du flux sont affectés par des erreurs dues à l'évaluation de la courbure de la section transversale en raison de la résolution du MNT. Sur base d'une analyse ROC, il ressort que le volume de ruissellement est le meilleur indicateur de ravinement. Cependant, les résultats obtenus avec cet indicateur ne sont pas satisfaisants car 1) la plupart des pixels ravinés ne sont pas prédits et 2) la probabilité maximale de prédiction d'occurrence du ravinement est de 34%. Deux facteurs expliquent principalement ces mauvais résultats. Il s'agit tout d'abord de l'erreur-type sur le volume de ruissellement prédit par le modèle hydrologique basé sur la méthode NRCS du Curve Number. Ensuite, la résolution du MNT ne permet pas de prendre en compte les éléments linéaires qui jouent un rôle crucial dans l'emplacement du ravinement en déviant ou en stoppant l'écoulement. La combinaison d'un modèle hydrologique amélioré et d'une résolution élevée de MNT devrait permettre d'améliorer la prédiction du ravinement en utilisant un indicateur simple.

Bibliographie

- Arcement Jr, G.J. and Schneider, V.R., 2008. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. US Geological Survey.
- Baveye, P.C., Laba, M., Otten, W., Bouckaert, L., Dello Sterpaio, P., Goswami, R.R., Grinev, D., Houston, A., Hu, Y., Liu, J., Mooney, S., Pajor, R., Sleutel, S., Tarquis, A., Wang, W., Wei, Q. and Sezgin, M., 2010. Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data. *Geoderma*, 157(1-2): 51-63.
- Beuselinck, L., Steegen, A., Govers, G., Nachtergaele, J., Takken, I. and Poesen, J., 2000. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. *Geomorphology*, 32(1): 69-82.
- Bielders, C.L., Ramelot, C. and Persoons, E., 2003. Farmer perception of runoff and erosion and extent of flooding in the silt-loam belt of the Belgian Walloon Region. *Environmental Science & Policy*, 6(1): 85-93.
- Bielders, C., Degré, A., Colard, F., Cordonnier, H., Destain, M.-F., Feltz, N., Maugnard, A., 2011. *Convention d'intérêt général - Gestion Intégrée Sol Erosion Ruissellement (GISER)*. Université catholique de Louvain – Gembloux Agro-BioTech – Direction Générale de l'Agriculture.
- Boardman, J. and Bell, M., 1992. Current erosion on the South Downs: implication for the past. In: Bell, M. and Boardman, J., (eds), *Past and present soil erosion: archaeological and geographical perspectives*. Oxbow Books Ltd, Oxford pp 9-19.
- Cazier, D.J. and Hawkins, R.H., 1984. Regional application of the curve number method. *Proceedings Speciality Conference, Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers*. Flagstaff, AZ. abstract p710.
- Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V. and Märker, M., 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204: 399-411.
- Cade, B.S. and Noon, B.R., 2003. A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1 (8): 412-420.
- Casali, J., López, J. and Giráldez, J., 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena*, 36(1): 65-84.
- Daba, S., Rieger, W. and Strauss, P., 2003. Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques. *Catena*, 50(2): 273-291.
- Demarcin, P., Degré, A., Smoos, A. and Dautrebande, S., 2009. *Projet ERRUISSOL. Cartographie numérique des zones à risque de ruissellement et d'érosion des sols en région wallonne. Rapport final de convention DGO3-FUSAGx*. Gembloux, Belgique: Unité d'hydrologie et hydraulique agricole, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. 55p.
- Demarcin, P., Sohier, C., Mokadem, A.I., Dautrebande, S. and Degré, A., 2011. Essai de cartographie des classes d'infiltrabilité des sols de Wallonie (Belgique). *Biotechnol. Agron. Soc.*, 15: 119-128.

- De Ploey, J., 1984. Hydraulics of runoff and loess loam deposition. *Earth surface processes and landforms*, 9(6): 533-539.
- Desmet, P. and Govers, G., 1997. Two-dimensional modelling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography. *Catena*, 29(3): 283-306.
- Desmet, P., Poesen, J., Govers, G. and Vandaele, K., 1999. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies. *Catena*, 37(3): 377-392.
- Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J. and Mashauri, D.A., 2014. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District – Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67-69: 145-152.
- Eustace, A.H., Pringle and M.J., Denham, R.J., 2011. A risk map for gully locations in central Queensland, Australia. *European Journal of Soil Science*, 62(3): 431-441.
- Evrard, O., Biélders, C.L., Vandaele, K. and van Wesemael, B., 2007. Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impacts and potential control measures. *Catena*, 70(3): 443-454.
- Evrard, O., Vandaele, K., Biélders, C. and Wesemael, B.v., 2008. Seasonal evolution of runoff generation on agricultural land in the Belgian loess belt and implications for muddy flood triggering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(8): 1285-1301.
- Flanagan, D. and Nearing, M., 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, Report No 10.
- Foster, G., 1982. Modeling the erosion process. In, In Hann C.T. (ed.) Poesen, J. (eds), *Hydrologic modeling of small watersheds*. ASAE Monograph No.5, St Joseph, Michigan. pp 296-360.
- Gardin, S., van Laere, S.M., van Coillie, F.M., Anseel, F., Duyck, W., de Wulf, R.R. and Verbeke, L.P., 2011. Remote sensing meets psychology: a concept for operator performance assessment. *Remote Sensing Letters*, 2(3): 251-257.
- Goudenhoofd, E. and Delobbe, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2): 195-203.
- Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Rauws, G., De Ploey, J. and Lautridou, J., 1990. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15(4): 313-328.
- Gutiérrez, Á.G., Schnabel, S. and Contador, F.L., 2009. Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. *Land Degradation & Development*, 20(5): 535-550.
- Hauge, C., 1977. Soil erosion definitions. *California Geology* 30: 202-203.
- Hawkins, R.H. and Khojeini, A.V., 2000. Initial abstraction and loss in the curve number method. *proceedings Arizona Hydrological Society*. (abstract).
- Hawkins, R.H., Ward, T.J., Woodward, D.E. and Van Mullem, J.A., 2009. *Curve number hydrology*. ASCE publication.

- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3): 275-370.
- Jetten, V., Poesen, J., Nachtergaele, J. and Van de Vlag, D., 2006. Spatial Modelling of Ephemeral Gully Incision: a Combined Empirical and Physical Approach. In, Owens, P.N. and Collins, A.J.(eds.), *Soil erosion and sediment redistribution in river catchments: measurement, modelling and management*, CABI International, Wallingford pp. 209–220
- John, O. and Nduka, E., 2009. Quantile Regression Analysis As a Robust Alternative to Ordinary Least Squares. *The Journal of Scientia Africana*, 8(2): 61-65.
- Kakembo, V., Xanga, W.W. and Rowntree, K., 2009. Topographic thresholds in gully development on the hillslopes of communal areas in Ngqushwa Local Municipality, Eastern Cape, South Africa. *Geomorphology*, 110(3-4): 188-194.
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G. and Nachtergaele, J., 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 80(1-2): 75-109.
- Knight, J., Spencer, J., Brooks, A. and Phinn, S., 2007. Large-area, high-resolution remote sensing based mapping of alluvial gully erosion in Australia's tropical rivers, *Proceedings of the 5th Australian Stream Management Conference*, pp. 199-204.
- Koenker, R., 1994. Confidence intervals for quantile regression. In: *Proceedings of the Fifth Prague Symposium on Asymptotic Statistics*. Physica-Verlag, Heidelberg, pp. 10–20.
- Koenker, R. and Hallock, K., 2001. Quantile regression: An introduction. *Journal of Economic Perspectives*, 15(4): 43-56.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V. and Martin, P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 62(2-3): 111-124.
- Leckie, D.G., Gougeon, F.A., Walsworth, N. and Paradine, D., 2003. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 355-369.
- Legros, J., Kolbl, O. and Falipou, P., 1996. Délimitation d'unités de paysage sur des photographies aériennes. *Etude et Gestion des Sols*, 3: 113-124.
- Lunetta, RS, Congalton, RG, Fenstermaker, LK, Jensen, JR, McGwire, KC and Tinney LR. 1991. Remote sensing and geographic information system data integration: error sources and research issues *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57 (6), 677-687.
- Makanzu Imwangana, F., Dewitte, O., Ntombi, M. and Moeyersons, J., 2014. Topographic and road control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). *Geomorphology*, 217: 131-139.
- Martinez-Casasnovas, J., 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50(2): 293-308.
- Momm, H., Bingner, R., Wells, R. and Wilcox, D., 2012. AGNPS GIS-based tool for watershed-scale identification and mapping of cropland potential ephemeral gullies. *Applied engineering in agriculture*, 28, 1–13

Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E., 1988. Where do channels begin? *Nature*, 336(6196): 232-234.

Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E., 1992. Channel initiation and the problem of landscape scale. *Science*, 255(5046): 826-830.

Moore, I., Burch, G. and Mackenzie, D., 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE*, 32 (4), 1098–1107.

Nachtergaele, J. and Poesen, J., 1999. Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(8): 693-706.

Nachtergaele, J., Poesen, J., Steegen, A., Takken, I., Beuselinck, L., Vandekerckhove, L. and Govers, G., 2001. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils. *Geomorphology*, 40(3): 237-252.

Nachtergaele, J., Poesen, J., Sidorchuk, A. and Torri, D., 2002. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels. *Hydrological Processes*, 16(10): 1935-1953.

Nearing, M., Norton, L., Bulgakov, D., Larionov, G., West, L. and Dontsova, K., 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, 33(4): 865-876.

NRCS, U., 2004. National Engineering Handbook: Part 630—Hydrology. USDA Soil Conservation Service: Washington, DC, USA.

Parkner, T., Page, M.J., Marutani, T. and Trustrum, N.A., 2006. Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East Coast, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2): 187-199.

Pasqualini, V., Pergent-Martini, C., Clabaut, P., Marteel, H. and Pergent, G., 2001. Integration of aerial remote sensing, photogrammetry, and GIS technologies in seagrass mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(1): 99-105.

Patton, P.C. and Schumm, S.A., 1975. Gully erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon. *Geology*, 3(2): 88-90.

Poesen, J., Vandaele, K. and van Wesemael, B., 1998. Gully erosion: importance and model implications. In, Boardman, J. and Favis-Mortlock, D.T. (eds.), *Modelling Soil Erosion by Water* Springer-Verlag, Berlin NATO-ASI Series, I-55:285-311 *Modelling soil erosion by water*. Springer, pp. 285-311.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2): 91-133.

Poesen, J., Vanwallegghem, T., de Vente, J., Knapen, A., Verstraeten, G. and Martínez-Casasnovas, J.A., 2006. Gully erosion in Europe. In, Boardman, J., and Poesen, J. (eds), *Soil erosion in Europe*. Wiley, Chichester. pp 515-536.

Poesen, J., Torri, D. and Vanwallegghem, T., 2011. Gully Erosion: Procedures to Adopt When Modelling Soil Erosion in Landscapes Affected by Gullying. In Morgan R.P.C. and Nearing M.A. (eds.), *Handbook of Erosion Modelling*, Blackwell Publishing Ltd, Chichester (2011), pp. 360–386

- Powell, R. and Matzke, N., 2004. Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 90(2): 221-234.
- Saito, H., Nakayama, D., Matsuyama, H., 2010. Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity—duration thresholds in Japan. *Geomorphology*, 118(1): 167-175.
- Sarmiento, P., Carrão, H., Caetano, M., Stehman, S.V., 2009. Incorporating reference classification uncertainty into the analysis of land cover accuracy. *International Journal of Remote Sensing*, 30(20): 5309-5321.
- Schumm, S.A., 1979. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Transactions of the Institute of British Geographers*: 485-515.
- Shruthi, R.B.V., Kerle, N., Jetten, V., 2011. Object-based gully feature extraction using high spatial resolution imagery. *Geomorphology*, 134(3-4): 260-268.
- Sohier, C., Degré, A. and Dautrebande, S., 2009. From root zone modelling to regional forecasting of nitrate concentration in recharge flows – the case of the Walloon region (Belgium). *Journal of Hydrology* 369, 350-359.
- Spitalnic, S., 2004. Test properties 2: likelihood ratios, Bayes' formula, and receiver operating characteristic curves. *Hospital Physician*, 40(10): 53-58.
- Steegen, A., Govers, G., Takken, I., Nachtergaele, J., Poesen, J. and Merckx, R., 2001. Factors controlling sediment and phosphorus export from two Belgian agricultural catchments. *Journal of Environmental Quality*, 30(4): 1249-1258.
- Takken, I., Beuselinck, L., Nachtergaele, J., Govers, G., Poesen, J. and Degraer, G., 1999. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena*, 37(3): 431-447.
- Te Chow, V., 1959. Open channel hydraulics. Mc-Graw Hill, New York (1959)
- Thierry, B. and Lowell, K., 2001. An uncertainty-based method of photointerpretation. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 67(1): 65-72.
- Thorne, C., Zevenbergen, L.W., Grissinger, E. and Murphey, J., 1986. Ephemeral gullies as sources of sediment, *Proceedings of the Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference March 24-27, 1986, Las Vegas, Nevada*.
- Tiscareno-Lopez, M., Lopes, V., Stone, J. and Lane, L., 1994. Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications. II. Channel processes. *Transactions of the ASAE*, 37(1): 151–158.
- Toy, T.J., Foster, G.R. and Renard, K.G., 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. John Wiley & Sons. New York (2002) 338 pp.
- Vandaele, K., Poesen, J., 1995. Spatial and temporal patterns of soil erosion rates in an agricultural catchment, central Belgium. *Catena*, 25(1): 213-226.
- Vandaele, K., Poesen, J., Govers, G., Wesemael, B.v., 1996. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. *Geomorphology*, 16(2): 161-173.
- Vandaele, K., Poesen, J., Marques da Silva, J., Govers, G., Desmet, P., 1997. Assessment of

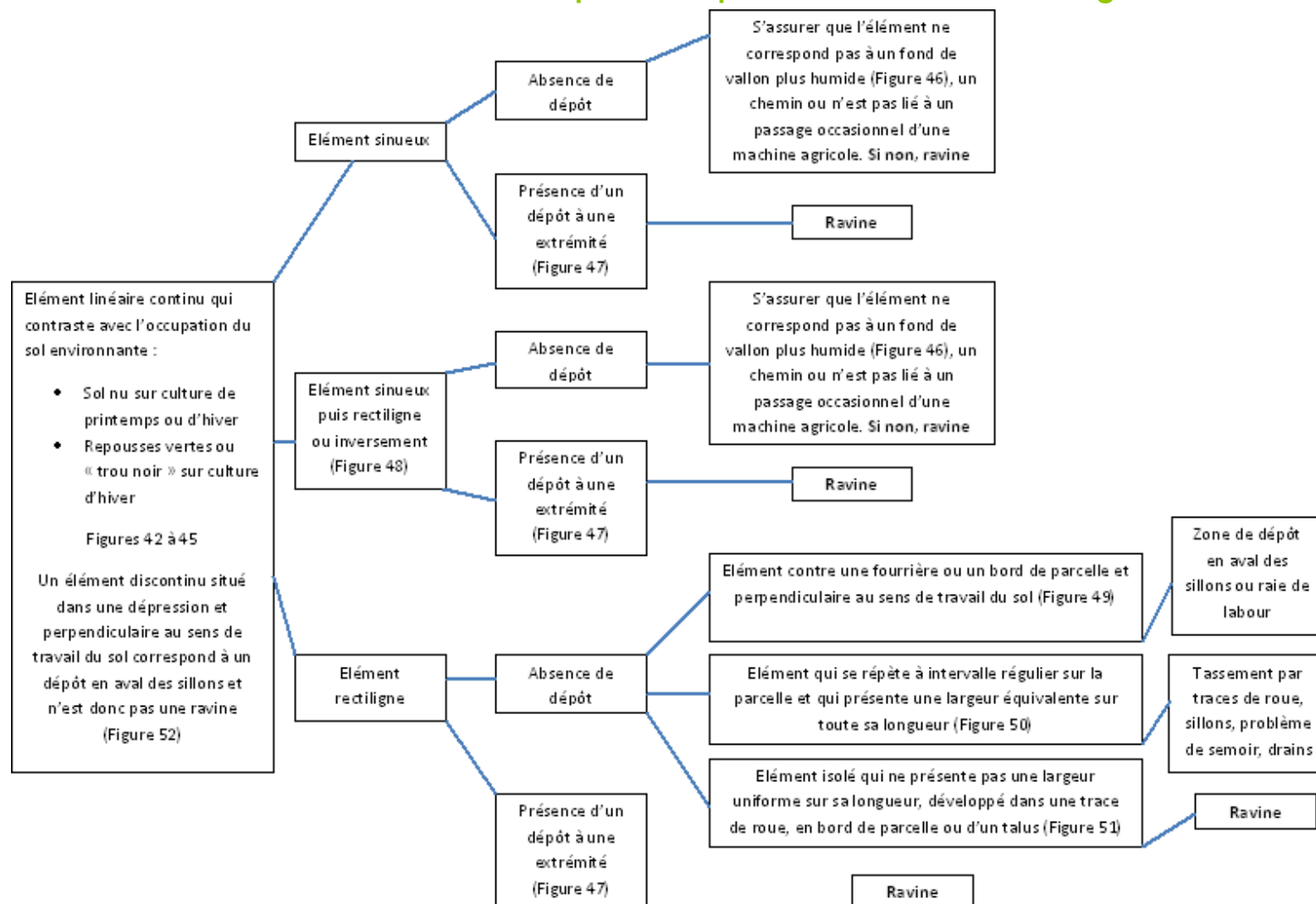
- Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud Wijdenes, D., De Figueiredo, T., 1998. Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean. *Catena*, 33(3): 271-292.
- Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud-Wijdenes, D., Nachtergaele, J., Kosmas, D., Roxo, M. and Figueiredo, T.d., 2000. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1201–1220.
- Van Oost, K., 2003. Spatially distributed modelling of surface runoff. PhD thesis, K.U. Leuven.
- Van Oost, K., Govers, G., Cerdan, O., Thauré, D., Van Rompaey, A., Steegen, A., Nachtergaele, J., Takken, I. and Poesen, J., 2005. Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets. *Catena*, 61(2): 105-121.
- Vanwalleghem, T., Poesen, J., Nachtergaele, J. and Verstraeten, G., 2005. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology*, 69(1-4): 76-91.
- Verstraeten, G., Poesen, J., Govers, G., Gillijns, K., Bielders, C., Goossens, D., Ruyschaert, G., Van Den Eeckhout, M. and Vanwalleghem, T., 2006. Belgium: chap. 1.30. In, Boardman, J., and Poesen, J. (eds), *Soil erosion in Europe*. Wiley, Chicester. pp 385-411.
- Wu, Y., Cheng, H., 2005. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system. *Catena*, 63(2-3): 154-166.
- Yang, C.T., 1977. The movement of sediment in rivers. *Geophysical surveys*, 3(1): 39-68.
- Yen, B.C., 1991. Hydraulic resistance in open channels. B.C. Yen (Ed.), *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula*, Water Resources Publication, Highlands Ranch, CO (1991)
- Zhou, W., Schwarz, K., Cadenasso, M., 2010. Mapping urban landscape heterogeneity: agreement between visual interpretation and digital classification approaches. *Landscape ecology*, 25(1): 53-67.

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 : Arbre de décision fourni aux 11 opérateurs pour l'identification et la digitalisation des ravines



Consignes supplémentaires

1. Le travail de repérage des ravines s'effectue au 1 :2500 avec le masque du SIGEC fourni. Rien n'empêche cependant le digitaliseur de zoomer ou dézoomer une fois une ravine repérée.
2. Deux éléments discontinus ne doivent pas être considérés comme une seule ravine mais être encodés comme deux éléments différents
3. Lorsque la zone de dépôt est très importante ou lorsque que le point d'incision se situe dans une zone très diffuse, l'extrémité est placée au centre de la zone.



Figure 43 : Éléments linéaires continus qui contrastent avec l'occupation du sol environnante, sol nu sur culture de printemps ou d'hiver = ravines



Figure 44 : Élément linéaire continu qui contraste avec l'occupation du sol environnante, « trou noir » sur culture d'hiver = ravine



Figure 45 : Élément linéaire continu qui contraste avec l'occupation du sol environnante repousses vertes sur culture d'hiver = ravine



Figure 46 : Fond de vallon plus humide = pas ravine



Figure 47 : Élément linéaire présentant un dépôt à une extrémité = ravine

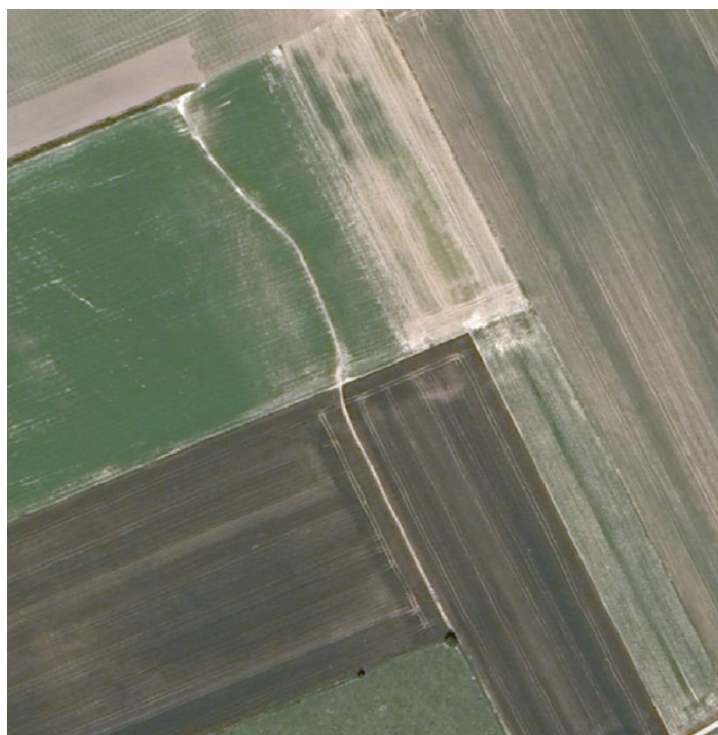


Figure 48 : Élément sinueux puis rectiligne = ravine dont la trajectoire est en partie influencée par un élément linéaire du paysage



Figure 49 : Élément en bord de parcelle et perpendiculaire au sens de travail du sol = pas ravine mais zone de dépôt en aval des sillons



Figure 50 : Éléments qui se répètent à intervalle régulier sur la parcelle et qui présente une largeur équivalente sur toute la longueur = pas ravine mais traces de roues ou éléments résultant d'un problème avec le semoir

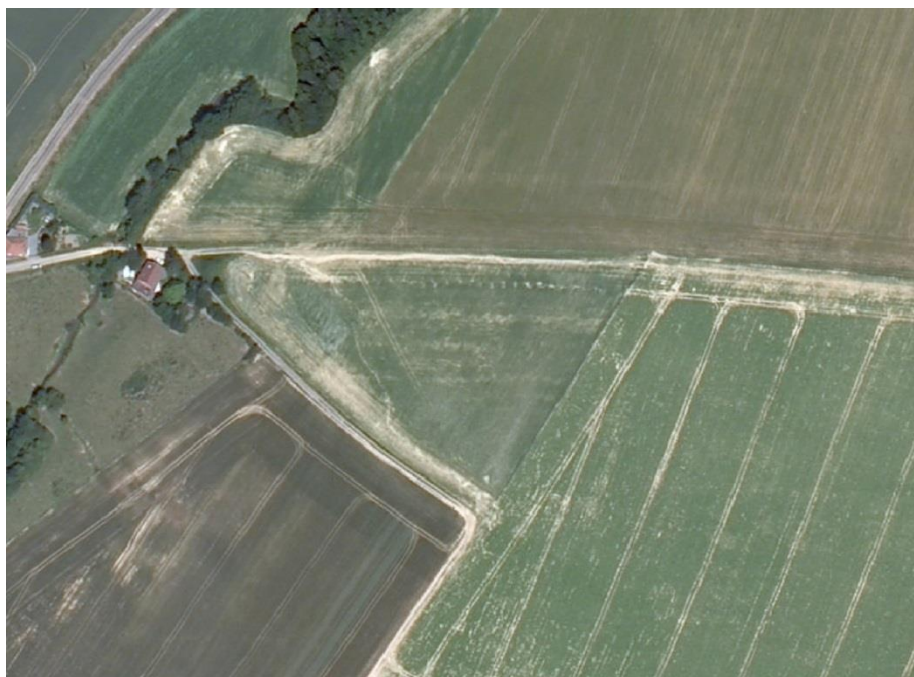


Figure 51 : Élément isolé qui ne présente pas un largeur uniforme sur toute sa longueur en bord de parcelle : ravine



Figure 52 : Élément discontinu situé dans une dépression et perpendiculaire au sens de travail du sol = pas ravine mais dépôt en aval des sillons

Annexe 2 : Clé de classification fourni aux 11 opérateurs

Clé de classification des ravines

1. La ravine présente plus de deux branches **passer au point 8**
La ravine présente au maximum deux branches **passer au point 2**
2. La ravine s'initie à cause d'un élément anthropique qui a favorisé l'accumulation du ruissellement (traces de roues, fourrière, limite de parcelle) **ravine de type 30**
Si non **passer au point 3**
3. Si les courbes IGN indiquent que la ravine se développe dans et/ou rejoint un vallon
Ou si la fonction Steepest Path indique une concentration de flux
Ou si la couche des axes de concentration coïncide avec la ravine **passer au point 4**
La ravine ne s'initie pas et ne rejoint pas un axe de concentration mais se développe perpendiculairement au courbe de niveau et /ou la fonction Steepest Path indique des cheminements d'eau parallèles **passer au point 5**
4. Le cheminement de la ravine suit l'axe de concentration **ravine de type 10**
Le parcours de la ravine n'est pas simplement influencé par la topographie (traces de roues, fourrière, limite parcellaire) **ravine de type 11**
5. La largeur moyenne de la ravine est d'au moins 2 pixels **passer au point 6**
Si non **passer au point 7**
6. Le cheminement de la ravine est uniquement influencé par la pente **ravine de type 20**
Le parcours de la ravine n'est pas simplement influencé par la pente (traces de roues, fourrière, limite parcellaire) **ravine de type 21**
7. Le cheminement de la ravine est uniquement influencé par la pente **ravine de type 40**
Le parcours de la ravine n'est pas simplement influencé par la pente (traces de roues, fourrière, limite parcellaire) **ravine de type 41**
8. La ravine s'initie à cause d'un élément anthropique qui a favorisé l'accumulation du ruissellement (traces de roues, fourrière, limite de parcelle) **ravine de type 530**
Si non **passer au point 9**
9. Si les courbes IGN indiquent que la ravine se développe dans et/ou rejoint un vallon
Ou si la fonction Steepest Path indique une concentration de flux
Ou si la couche des axes de concentration coïncide avec la ravine **passer au point 10**
La ravine ne s'initie pas et ne rejoint pas un axe de concentration mais se développe perpendiculairement au courbe de niveau et /ou la fonction Steepest Path indique des cheminements d'eau parallèle **passer au point 11**

10. Le cheminement de la ravine suit l'axe de concentration **ravine de type 510**
 Le parcours de la ravine n'est pas simplement influencé par la topographie (traces de roues, fourrière, limite parcellaire) **ravine de type 511**
11. La largeur moyenne de la ravine est d'au moins 2 pixels **passer au point 12**
 Si non **passer au point 13**
12. Le cheminement de la ravine est uniquement influencé par la pente **ravine de type 520**
 Le parcours de la ravine n'est pas simplement influencé par la pente (traces de roues, fourrière, limite parcellaire) **ravine de type 521**
13. Le cheminement de la ravine est uniquement influencé par la pente **ravine de type 540**
 Le parcours de la ravine n'est pas simplement influencé par la pente (traces de roues, fourrière, limite parcellaire) **ravine de type 541**

<u>Type de ravine</u>	Code	
	<u>Ramifications ≤ 2</u>	<u>Ramifications >2</u>
Initiée par un effet anthropique (Type 3)	30	530
Sur axe de concentration (Type 1)	10	510
Sur axe de concentration puis anthropique (Mixte Type1 et Type 3)	11	511
Hors axe de concentration > 2 pixels (Type 2)	20	520
Hors axe de concentration puis anthropique > 2 pixels (Mixte Type3 et Type 1)	21	521
Hors axe de concentration < 2 pixels (Type 2)	40	540
Hors axe de concentration puis anthropique < 2 pixels (Mixte Type 2 et Type 3)	41	541

Annexe 3 : Pourcentage de couverture du sol par la végétation (Cc, Equations 8 et 19) selon le type de culture par décade

Mois	Decade	Betterave	Maïs	Lin	Pomme de terre	Froment	Escourgeon	Epeautre	Colza	Luzerne	Céréales de printemps	Haricot	Culture maraîchère	Pois
1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	15.2	63.7	14.7	66.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	0.0	0.0	0.0	0.0	15.4	65.0	14.7	60.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	3	0.0	0.0	0.0	0.0	15.6	66.3	14.7	54.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1	0.0	0.0	0.0	0.0	15.8	67.6	14.7	49.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	68.9	14.7	43.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	3	0.0	0.0	0.0	0.0	16.2	70.2	14.7	37.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1	0.0	0.0	0.0	0.0	16.4	71.5	14.7	32.2	12.5	6.8	0.0	0.0	0.0
3	2	0.0	0.0	0.0	0.0	21.2	72.8	18.7	46.5	25.0	13.5	0.0	0.0	0.0
3	3	0.2	0.0	0.1	0.0	31.6	76.8	22.6	60.7	37.5	20.3	0.0	0.0	0.0
4	1	0.4	0.0	0.1	0.0	41.9	80.8	26.5	75.0	50.0	27.0	0.0	0.0	0.0
4	2	0.5	0.0	0.2	0.0	52.2	82.2	58.6	81.6	62.5	33.8	0.0	7.0	9.1
4	3	0.7	0.0	0.2	0.0	75.7	83.3	62.5	86.0	75.0	40.5	0.0	14.0	18.2
5	1	0.9	0.0	0.3	4.9	77.0	83.8	66.4	88.5	87.5	47.3	0.0	21.0	27.3
5	2	7.8	1.9	0.5	9.9	78.3	84.2	70.3	91.0	100.0	54.0	0.0	28.0	36.4
5	3	14.8	3.9	0.7	14.8	79.6	84.7	74.2	93.6	100.0	60.8	0.0	35.0	45.5
6	1	48.8	20.0	0.7	22.6	85.7	93.0	79.9	93.7	100.0	67.5	7.8	42.0	54.6
6	2	56.3	22.7	0.7	72.5	85.7	94.2	83.3	93.8	100.0	74.3	15.6	49.0	63.7
6	3	69.2	42.2	0.7	86.6	85.7	95.5	83.5	93.9	100.0	81.0	23.3	56.0	72.8
7	1	82.1	60.9	0.7	89.0	85.7	95.5	83.5	93.9	100.0	87.8	31.1	63.0	81.9
7	2	81.5	74.3	0.7	91.3	85.7	95.5	83.5	93.9	100.0	88.2	38.9	70.0	91.0
7	3	86.2	80.6	0.0	93.7	85.7	0.0	83.5	0.0	100.0	88.2	46.7	0.0	0.0
8	1	89.8	81.8	0.0	93.7	85.7	0.0	83.5	0.0	100.0	88.2	54.4	0.0	0.0
8	2	89.7	83.4	0.0	64.5	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	62.2	0.0	0.0
8	3	89.5	84.8	0.0	35.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	70.0	0.0	0.0
9	1	89.4	86.2	0.0	35.3	0.0	0.0	0.0	0.8	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	2	89.2	86.2	0.0	35.3	0.0	0.0	0.0	1.5	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	3	90.3	86.2	0.0	35.3	0.0	0.0	0.0	17.5	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1	90.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2	90.3	0.0	0.0	0.0	1.8	11.2	1.3	72.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	3	90.3	0.0	0.0	0.0	3.4	22.4	4.0	73.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	1	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	33.5	6.7	74.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	45.9	9.4	75.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	3	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	58.2	16.9	76.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	1	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	59.6	15.7	76.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	2	0.0	0.0	0.0	0.0	14.7	61.1	14.5	77.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	3	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0	62.4	14.5	71.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Annexe 4 : Stade d'encroûtement du sol (Cr, Equations 5 et 18) selon le type de culture par décade. F0 : structure fragmentaire initiale, F11 : structure fragmentaire altérée avec des croutes structurales, F12 : encroûtement local, F2 : encroûtement généralisé de la surface

Mois	Decade	Betterave	Maïs	Lin	Pomme de terre	Froment	Escourgeon	Epeautre	Colza	Luzerne	Céréales de printemps	Haricot	Culture maraîchère	Pois
1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2
1	3	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2
2	1	3	4	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
2	2	3	4	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
2	3	3	4	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
3	1	1	1	4	2	3	3	3	3	1	1	2	2	2
3	2	1	1	4	2	3	3	3	3	1	1	2	2	2
3	3	1	1	4	2	3	3	3	3	1	1	2	2	2
4	1	1	2	1	2	3	3	3	3	1	1	2	2	2
4	2	1	2	1	2	3	3	3	3	1	1	2	2	2
4	3	1	2	1	2	3	3	3	3	1	1	2	2	2
5	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
5	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
6	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
6	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
7	1	3	4	2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	2	3	4	2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	3	3	4	2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	1	3	4	1	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	2	3	4	1	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	3	3	4	1	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
9	1	3	4	1	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
9	2	3	4	1	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
9	3	3	4	1	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	1	3	4	2	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3
10	2	3	4	2	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3
10	3	3	4	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
11	1	3	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
11	2	3	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
11	3	3	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
12	1	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
12	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
12	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3

Annexe 5 : Valeur de CN modifiée selon la culture et par décade selon l'Equation 8 pour un sol de groupe hydrologique A

Mois	Decade	Betterave	Maïs	Lin	Pomme de terre	Froment	Escourgeon	Epeautre	Colza	Luzerne	Céréales de printemps	Haricot	Culture maraîchère	Pois
1	1	74.5	74.5	74.5	74.5	73.2	70.8	73.3	67.0	71.5	71.0	74.5	74.5	74.5
1	2	74.5	74.5	74.5	74.5	73.2	70.7	73.3	67.6	71.5	71.0	74.5	74.5	74.5
1	3	74.5	74.5	74.5	74.5	73.2	70.7	73.3	68.2	71.5	71.0	74.5	74.5	74.5
2	1	75.8	77.0	74.5	75.8	73.2	70.6	73.3	68.8	74.3	74.0	74.5	74.5	74.5
2	2	75.8	77.0	74.5	75.8	73.2	70.6	73.3	69.5	74.3	74.0	74.5	74.5	74.5
2	3	75.8	77.0	74.5	75.8	73.2	70.5	73.3	70.1	74.3	74.0	74.5	74.5	74.5
3	1	73.3	73.3	77.0	74.5	73.2	70.4	73.3	70.7	67.4	67.7	74.5	74.5	74.5
3	2	73.3	73.3	77.0	74.5	72.9	70.4	73.1	69.1	66.0	67.3	74.5	74.5	74.5
3	3	73.2	73.3	77.0	74.5	72.4	70.2	72.9	67.6	64.6	67.0	74.5	74.5	74.5
4	1	73.2	74.5	73.2	74.5	71.9	70.0	72.7	66.0	63.3	66.6	74.5	74.5	74.5
4	2	73.2	74.5	73.2	74.5	71.4	69.9	71.1	65.3	61.9	66.3	74.5	74.5	73.8
4	3	73.2	74.5	73.2	74.5	70.2	69.8	70.9	64.8	60.5	66.0	74.5	74.5	73.0
5	1	75.7	75.8	75.7	75.4	70.2	69.8	70.7	64.5	64.6	71.6	74.5	74.5	72.3
5	2	75.1	75.6	75.7	75.0	70.1	69.8	70.5	64.2	63.3	71.3	74.5	74.5	71.6
5	3	74.6	75.4	75.7	74.6	70.0	69.8	70.3	64.0	63.3	71.0	74.5	74.5	70.9
6	1	71.8	74.2	75.7	73.9	69.7	69.3	70.0	63.9	63.3	70.6	73.9	74.5	70.1
6	2	71.2	73.9	75.7	70.0	69.7	69.3	69.8	63.9	63.3	70.3	73.3	74.5	69.4
6	3	70.2	72.4	75.7	68.8	69.7	69.2	69.8	63.9	63.3	69.9	72.6	74.5	68.7
7	1	69.2	72.1	74.4	69.9	69.7	69.2	69.8	63.9	63.3	69.6	73.3	75.8	69.2
7	2	69.2	71.1	74.4	69.7	69.7	69.2	69.8	63.9	63.3	69.6	72.6	75.8	68.5
7	3	68.9	70.6	74.5	69.5	69.7	74.0	69.8	74.3	63.3	69.6	72.0	75.8	75.8
8	1	68.6	70.5	73.3	69.5	69.7	74.0	69.8	74.3	63.3	69.6	71.4	75.8	75.8
8	2	68.6	70.3	73.3	71.8	74.0	74.0	74.0	74.3	63.3	74.0	70.8	75.8	75.8
8	3	68.6	70.2	73.3	74.2	74.0	74.0	74.0	74.3	63.3	74.0	70.2	75.8	75.8
9	1	68.6	70.1	73.3	74.2	74.0	74.0	74.0	74.2	63.3	74.0	75.8	75.8	75.8
9	2	68.6	70.1	73.3	74.2	74.0	74.0	74.0	74.1	63.3	74.0	75.8	75.8	75.8
9	3	68.5	70.1	73.3	74.2	74.0	74.0	74.0	72.3	63.3	74.0	75.8	75.8	75.8
10	1	68.5	77.0	74.5	75.8	71.0	71.0	71.0	67.8	74.3	74.0	75.8	75.8	75.8
10	2	68.5	77.0	74.5	75.8	70.9	70.4	70.9	63.5	74.3	74.0	75.8	75.8	75.8
10	3	68.5	77.0	74.5	75.8	70.8	69.9	70.8	63.4	74.3	74.0	75.8	75.8	75.8
11	1	75.8	73.3	74.5	74.5	70.7	69.3	70.7	63.3	74.3	74.0	75.8	75.8	75.8
11	2	75.8	73.3	74.5	74.5	70.7	68.7	70.5	63.2	74.3	74.0	75.8	75.8	75.8
11	3	75.8	73.3	74.5	74.5	70.6	68.1	70.2	63.1	74.3	74.0	75.8	75.8	75.8
12	1	74.5	75.8	74.5	74.5	70.6	68.0	70.2	63.0	71.5	71.0	75.8	75.8	75.8
12	2	74.5	75.8	74.5	74.5	70.3	67.9	70.3	63.0	71.5	71.0	75.8	75.8	75.8
12	3	74.5	75.8	74.5	74.5	70.3	67.9	70.3	63.6	71.5	71.0	75.8	75.8	75.8

Annexe 6: Valeur de CN modifiée selon la culture et par décade selon l'Equation 8 pour un sol de groupe hydrologique B

Mois	Décade	Betterave	Maïs	Lin	Pomme de terre	Froment	Escourgeon	Epeautre	Colza	Luzerne	Céréales de printemps	Haricot	Culture maraîchère	Pois
1	1	83.5	83.5	83.5	83.5	82.9	81.0	82.9	78.5	81.5	81.0	83.5	83.5	83.5
1	2	83.5	83.5	83.5	83.5	82.9	80.9	82.9	78.9	81.5	81.0	83.5	83.5	83.5
1	3	83.5	83.5	83.5	83.5	82.9	80.8	82.9	79.4	81.5	81.0	83.5	83.5	83.5
2	1	84.8	86.0	83.5	84.8	82.9	80.8	82.9	79.8	83.8	83.5	83.5	83.5	83.5
2	2	84.8	86.0	83.5	84.8	82.9	80.7	82.9	80.3	83.8	83.5	83.5	83.5	83.5
2	3	84.8	86.0	83.5	84.8	82.9	80.7	82.9	80.7	83.8	83.5	83.5	83.5	83.5
3	1	82.3	82.3	86.0	83.5	82.8	80.6	82.9	81.2	78.3	78.2	83.5	83.5	83.5
3	2	82.3	82.3	86.0	83.5	82.7	80.6	82.8	80.0	77.3	78.0	83.5	83.5	83.5
3	3	82.2	82.3	86.0	83.5	82.2	80.4	82.6	78.9	76.3	77.7	83.5	83.5	83.5
4	1	82.2	83.5	82.2	83.5	81.8	80.3	82.4	77.7	75.3	77.4	83.5	83.5	83.5
4	2	82.2	83.5	82.2	83.5	81.4	80.2	81.2	77.2	74.3	77.1	83.5	83.5	83.0
4	3	82.2	83.5	82.2	83.5	80.5	80.2	81.0	76.9	73.3	76.9	83.5	83.5	82.4
5	1	84.7	84.8	84.7	84.5	80.4	80.1	80.8	76.7	76.8	81.6	83.5	83.5	81.9
5	2	84.3	84.6	84.7	84.2	80.4	80.1	80.7	76.5	75.8	81.3	83.5	83.5	81.3
5	3	83.9	84.5	84.7	83.9	80.3	80.1	80.5	76.3	75.8	81.1	83.5	83.5	80.8
6	1	81.8	83.6	84.7	83.4	80.1	79.8	80.3	76.3	75.8	80.8	83.0	83.5	80.2
6	2	81.4	83.4	84.8	80.4	80.1	79.7	80.2	76.2	75.8	80.5	82.6	83.5	79.7
6	3	80.6	82.2	84.8	79.6	80.1	79.7	80.2	76.2	75.8	80.3	82.1	83.5	79.1
7	1	79.8	82.3	83.5	80.7	80.1	79.7	80.2	76.2	75.8	80.0	82.9	84.8	79.8
7	2	79.9	81.5	83.5	80.5	80.1	79.7	80.2	76.2	75.8	80.0	82.4	84.8	79.3
7	3	79.6	81.2	83.5	80.4	80.1	83.5	80.2	83.8	75.8	80.0	82.0	84.8	84.8
8	1	79.4	81.1	82.3	80.4	80.1	83.5	80.2	83.8	75.8	80.0	81.5	84.8	84.8
8	2	79.4	81.0	82.3	82.1	83.5	83.5	83.5	83.8	75.8	83.5	81.0	84.8	84.8
8	3	79.4	80.9	82.3	83.9	83.5	83.5	83.5	83.8	75.8	83.5	80.6	84.8	84.8
9	1	79.4	80.8	82.3	83.9	83.5	83.5	83.5	83.7	75.8	83.5	84.8	84.8	84.8
9	2	79.4	80.8	82.3	83.9	83.5	83.5	83.5	83.6	75.8	83.5	84.8	84.8	84.8
9	3	79.3	80.8	82.3	83.9	83.5	83.5	83.5	82.3	75.8	83.5	84.8	84.8	84.8
10	1	79.3	86.0	83.5	84.8	81.0	81.0	81.0	78.8	83.8	83.5	84.8	84.8	84.8
10	2	79.3	86.0	83.5	84.8	80.9	80.6	80.9	75.7	83.8	83.5	84.8	84.8	84.8
10	3	79.3	86.0	83.5	84.8	80.9	80.1	80.8	75.6	83.8	83.5	84.8	84.8	84.8
11	1	84.8	82.3	83.5	83.5	80.8	79.7	80.7	75.5	83.8	83.5	84.8	84.8	84.8
11	2	84.8	82.3	83.5	83.5	80.7	79.2	80.6	75.5	83.8	83.5	84.8	84.8	84.8
11	3	84.8	82.3	83.5	83.5	80.7	78.7	80.3	75.4	83.8	83.5	84.8	84.8	84.8
12	1	83.5	84.8	83.5	83.5	80.7	78.6	80.4	75.3	81.5	81.0	84.8	84.8	84.8
12	2	83.5	84.8	83.5	83.5	80.4	78.6	80.4	75.3	81.5	81.0	84.8	84.8	84.8
12	3	83.5	84.8	83.5	83.5	80.4	78.5	80.4	75.8	81.5	81.0	84.8	84.8	84.8

Annexe 7: Valeur de CN modifiée selon la culture et par décade selon l'Equation 8 pour un sol de groupe hydrologique C

Mois	Décade	Betterave	Maïs	Lin	Pomme de terre	Froment	Escourgeon	Epeautre	Colza	Luzerne	Céréales de printemps	Haricot	Culture maraîchère	Pois
1	1	89.5	89.5	89.5	89.5	88.6	86.7	88.7	84.9	88.0	87.5	89.5	89.1	89.5
1	2	89.5	89.5	89.5	89.5	88.6	86.6	88.7	85.3	88.0	87.5	89.5	89.1	89.5
1	3	89.5	89.5	89.5	89.5	88.6	86.6	88.7	85.7	88.0	87.5	89.5	89.1	89.5
2	1	90.3	91.0	89.5	90.3	88.6	86.5	88.7	86.1	89.5	89.3	89.5	89.1	89.5
2	2	90.3	91.0	89.5	90.3	88.6	86.5	88.7	86.5	89.5	89.3	89.5	89.1	89.5
2	3	90.3	91.0	89.5	90.3	88.6	86.4	88.7	86.9	89.5	89.3	89.5	89.1	89.5
3	1	88.8	88.8	91.0	89.5	88.6	86.4	88.7	87.2	85.6	85.5	89.5	89.1	89.5
3	2	88.8	88.8	91.0	89.5	88.4	86.3	88.5	86.2	84.8	85.2	89.5	89.1	89.5
3	3	88.7	88.8	91.0	89.5	88.0	86.2	88.3	85.2	83.9	84.9	89.5	89.1	89.5
4	1	88.7	89.5	88.7	89.5	87.6	86.0	88.2	84.2	83.0	84.7	89.5	89.1	89.5
4	2	88.7	89.5	88.7	89.5	87.2	86.0	86.9	83.8	82.1	84.4	89.5	89.1	89.0
4	3	88.7	89.5	88.7	89.5	86.2	85.9	86.7	83.5	81.3	84.1	89.5	89.1	88.4
5	1	90.2	90.3	90.2	90.0	86.2	85.9	86.6	83.3	83.4	87.4	89.5	89.1	87.9
5	2	89.8	90.1	90.2	89.7	86.1	85.9	86.4	83.1	82.5	87.1	89.5	89.1	87.3
5	3	89.4	90.0	90.2	89.4	86.1	85.9	86.3	83.0	82.5	86.8	89.5	89.1	86.8
6	1	87.3	89.1	90.2	88.9	85.8	85.5	86.1	82.9	82.5	86.5	89.0	89.1	86.2
6	2	86.9	88.9	90.3	85.9	85.8	85.5	85.9	82.9	82.5	86.3	88.6	89.1	85.7
6	3	86.1	87.7	90.3	85.1	85.8	85.4	85.9	82.9	82.5	86.0	88.1	89.1	85.1
7	1	85.3	87.3	89.5	85.7	85.8	85.4	85.9	82.9	82.5	85.7	88.4	89.8	85.3
7	2	85.4	86.5	89.5	85.5	85.8	85.4	85.9	82.9	82.5	85.7	87.9	89.8	84.8
7	3	85.1	86.2	89.5	85.4	85.8	89.3	85.9	89.5	82.5	85.7	87.5	89.8	90.3
8	1	84.9	86.1	88.8	85.4	85.8	89.3	85.9	89.5	82.5	85.7	87.0	89.8	90.3
8	2	84.9	86.0	88.8	87.1	89.3	89.3	89.3	89.5	82.5	89.3	86.5	89.8	90.3
8	3	84.9	85.9	88.8	88.9	89.3	89.3	89.3	89.5	82.5	89.3	86.1	89.8	90.3
9	1	84.9	85.8	88.8	88.9	89.3	89.3	89.3	89.4	82.5	89.3	90.3	89.8	90.3
9	2	84.9	85.8	88.8	88.9	89.3	89.3	89.3	89.4	82.5	89.3	90.3	89.8	90.3
9	3	84.8	85.8	88.8	88.9	89.3	89.3	89.3	88.3	82.5	89.3	90.3	89.8	90.3
10	1	84.8	91.0	89.5	90.3	87.5	87.5	87.5	85.7	89.5	89.3	90.3	89.8	90.3
10	2	84.8	91.0	89.5	90.3	87.4	87.1	87.4	82.9	89.5	89.3	90.3	89.8	90.3
10	3	84.8	91.0	89.5	90.3	87.4	86.6	87.3	82.9	89.5	89.3	90.3	89.8	90.3
11	1	90.3	88.8	89.5	89.5	87.3	86.2	87.2	82.8	89.5	89.3	90.3	89.8	90.3
11	2	90.3	88.8	89.5	89.5	87.2	85.7	87.1	82.7	89.5	89.3	90.3	89.8	90.3
11	3	90.3	88.8	89.5	89.5	87.2	85.2	86.8	82.6	89.5	89.3	90.3	89.8	90.3
12	1	89.5	90.3	89.5	89.5	87.2	85.1	86.9	82.6	88.0	87.5	90.3	89.8	90.3
12	2	89.5	90.3	89.5	89.5	86.9	85.1	86.9	82.6	88.0	87.5	90.3	89.8	90.3
12	3	89.5	90.3	89.5	89.5	86.9	85.0	86.9	83.0	88.0	87.5	90.3	89.8	90.3

Annexe 8 : Valeur de CN modifiée selon la culture et par décade selon l'Equation 8 pour un sol de groupe hydrologique D

Mois	Decade	Betterave	Maïs	Lin	Pomme de terre	Froment	Escourgeon	Epeautre	Colza	Luzerne	Céréales de printemps	Haricot	Culture maraîchère	Pois
1	1	92.5	92.5	92.5	92.5	91.9	90.0	91.9	88.8	91.5	91.0	92.5	90.0	92.5
1	2	92.5	92.5	92.5	92.5	91.9	89.9	91.9	89.1	91.5	91.0	92.5	90.0	92.5
1	3	92.5	92.5	92.5	92.5	91.9	89.8	91.9	89.5	91.5	91.0	92.5	90.0	92.5
2	1	93.3	94.0	92.5	93.3	91.9	89.8	91.9	89.8	92.8	92.5	92.5	90.0	92.5
2	2	93.3	94.0	92.5	93.3	91.9	89.7	91.9	90.1	92.8	92.5	92.5	90.0	92.5
2	3	93.3	94.0	92.5	93.3	91.9	89.7	91.9	90.5	92.8	92.5	92.5	90.0	92.5
3	1	91.8	91.8	94.0	92.5	91.8	89.6	91.9	90.8	89.5	89.2	92.5	90.0	92.5
3	2	91.8	91.8	94.0	92.5	91.7	89.6	91.8	90.0	88.8	89.0	92.5	90.0	92.5
3	3	91.7	91.8	94.0	92.5	91.2	89.4	91.6	89.1	88.0	88.7	92.5	90.0	92.5
4	1	91.7	92.5	91.7	92.5	90.8	89.3	91.4	88.2	87.3	88.4	92.5	90.0	92.5
4	2	91.7	92.5	91.7	92.5	90.4	89.2	90.2	87.9	86.5	88.1	92.5	90.0	92.0
4	3	91.7	92.5	91.7	92.5	89.5	89.2	90.0	87.6	85.8	87.9	92.5	90.0	91.4
5	1	93.2	93.3	93.2	93.0	89.4	89.1	89.8	87.4	87.5	90.6	92.5	90.0	90.9
5	2	92.8	93.1	93.2	92.7	89.4	89.1	89.7	87.3	86.8	90.3	92.5	90.0	90.3
5	3	92.4	93.0	93.2	92.4	89.3	89.1	89.5	87.1	86.8	90.1	92.5	90.0	89.8
6	1	90.3	92.1	93.2	91.9	89.1	88.8	89.3	87.1	86.8	89.8	92.0	90.0	89.2
6	2	89.9	91.9	93.3	88.9	89.1	88.7	89.2	87.1	86.8	89.5	91.6	90.0	88.7
6	3	89.1	90.7	93.3	88.1	89.1	88.7	89.2	87.1	86.8	89.3	91.1	90.0	88.1
7	1	88.3	90.3	92.5	88.7	89.1	88.7	89.2	87.1	86.8	89.0	91.4	90.7	88.3
7	2	88.4	89.5	92.5	88.5	89.1	88.7	89.2	87.1	86.8	89.0	90.9	90.7	87.8
7	3	88.1	89.2	92.5	88.4	89.1	92.5	89.2	92.8	86.8	89.0	90.5	90.7	93.3
8	1	87.9	89.1	91.8	88.4	89.1	92.5	89.2	92.8	86.8	89.0	90.0	90.7	93.3
8	2	87.9	89.0	91.8	90.1	92.5	92.5	92.5	92.8	86.8	92.5	89.5	90.7	93.3
8	3	87.9	88.9	91.8	91.9	92.5	92.5	92.5	92.8	86.8	92.5	89.1	90.7	93.3
9	1	87.9	88.8	91.8	91.9	92.5	92.5	92.5	92.7	86.8	92.5	93.3	90.7	93.3
9	2	87.9	88.8	91.8	91.9	92.5	92.5	92.5	92.7	86.8	92.5	93.3	90.7	93.3
9	3	87.8	88.8	91.8	91.9	92.5	92.5	92.5	91.7	86.8	92.5	93.3	90.7	93.3
10	1	87.8	94.0	92.5	93.3	91.0	91.0	91.0	89.5	92.8	92.5	93.3	90.7	93.3
10	2	87.8	94.0	92.5	93.3	90.9	90.6	90.9	87.2	92.8	92.5	93.3	90.7	93.3
10	3	87.8	94.0	92.5	93.3	90.9	90.1	90.8	87.1	92.8	92.5	93.3	90.7	93.3
11	1	93.3	91.8	92.5	92.5	90.8	89.7	90.7	87.0	92.8	92.5	93.3	90.7	93.3
11	2	93.3	91.8	92.5	92.5	90.7	89.2	90.6	87.0	92.8	92.5	93.3	90.7	93.3
11	3	93.3	91.8	92.5	92.5	90.7	88.7	90.3	86.9	92.8	92.5	93.3	90.7	93.3
12	1	92.5	93.3	92.5	92.5	90.7	88.6	90.4	86.9	91.5	91.0	93.3	90.7	93.3
12	2	92.5	93.3	92.5	92.5	90.4	88.6	90.4	86.9	91.5	91.0	93.3	90.7	93.3
12	3	92.5	93.3	92.5	92.5	90.4	88.5	90.4	87.2	91.5	91.0	93.3	90.7	93.3

Annexe 9 : Développement de l'Equation 16

Pour une section circulaire de rayon r [m], remplie de moins de la moitié et en assumant un écoulement stationnaire tel que décrit par l'équation de Manning (equation 14), on observe une relation linéaire parfaite entre le logarithme de la hauteur d'eau H et $\log(\frac{Q * n}{S^{0.5}})$ (Figure 54, Equation 27).

$$\text{Log}(H) = a(r) * \text{Log}(\frac{Q * n}{S^{0.5}}) + b(r) \quad (\text{Equation 27})$$

Connaissant le débit Q , la pente S , le coefficient de Manning n à un endroit donné, il est possible de déduire H . Cependant, les coefficients a et b changent avec r . Néanmoins, on observe qu'ils évoluent de façon monotone avec le rayon. Le coefficient a décroît vers une valeur asymptotique selon une fonction de puissance (Figure 55, Equation 28), et b décroît de façon exponentielle (Figure 56, Equation 29).

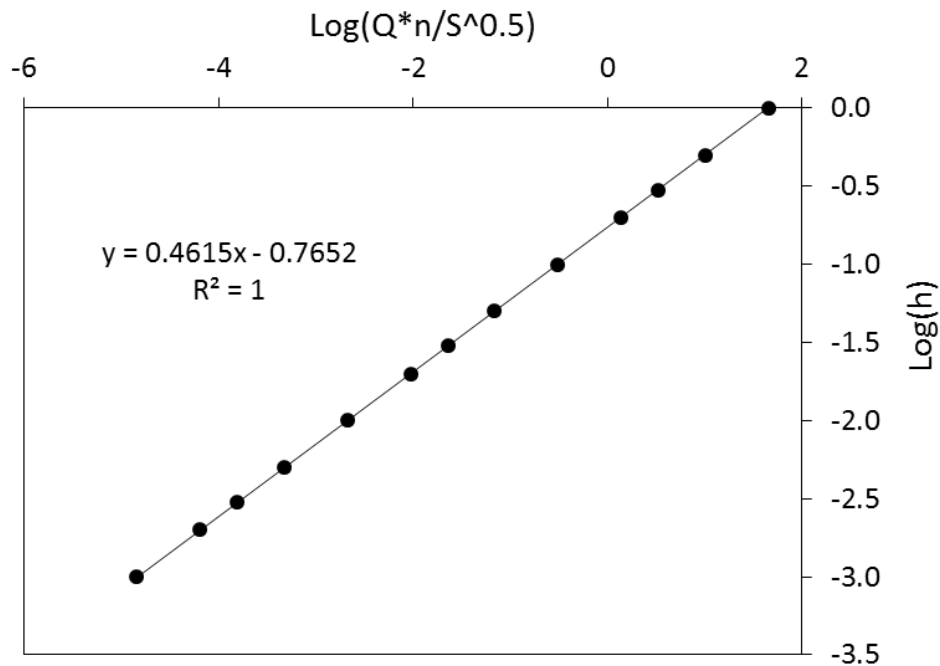


Figure 54 : Relation entre $\log(H)$ et $\log(\frac{Q * n}{S^{0.5}})$ pour un rayon de 1000 m

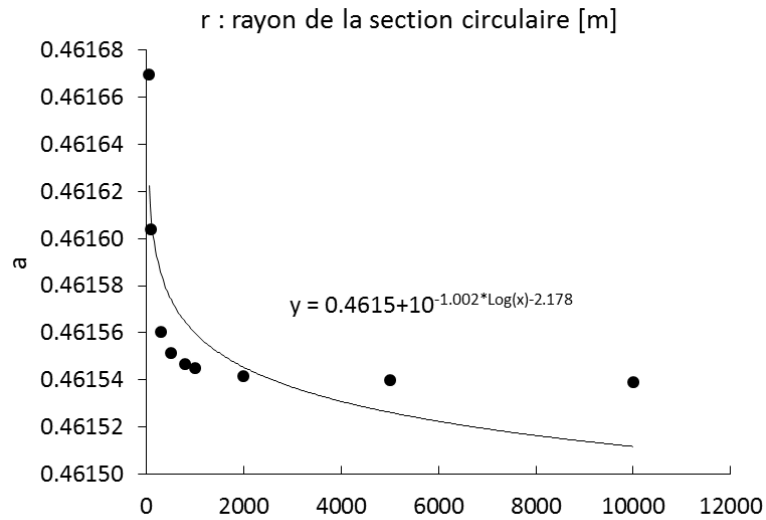


Figure 55 : Relation entre a et le rayon de la section circulaire

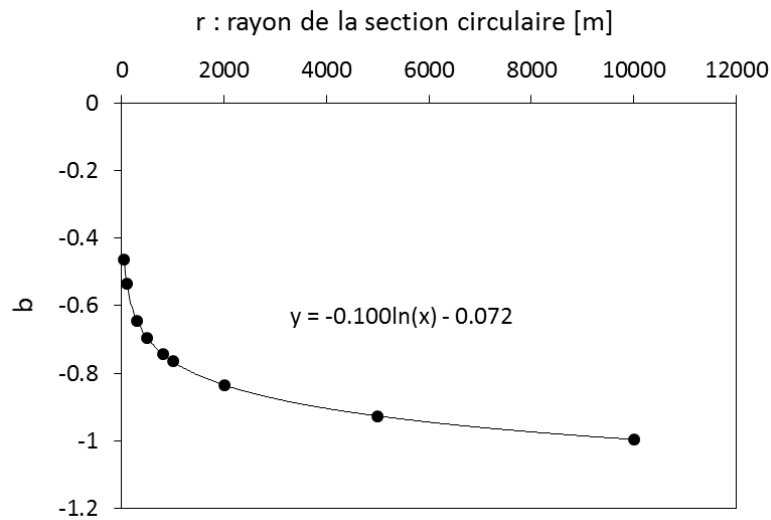


Figure 56 : Relation entre b et le rayon de la section circulaire

$$a = 0.46 + 10^{-1.00 \cdot \text{Log}(r) - 2.18}$$

(Equation 28)

$$b = -0.10 \cdot \text{Ln}(r) - 0.07$$

(Equation 29)

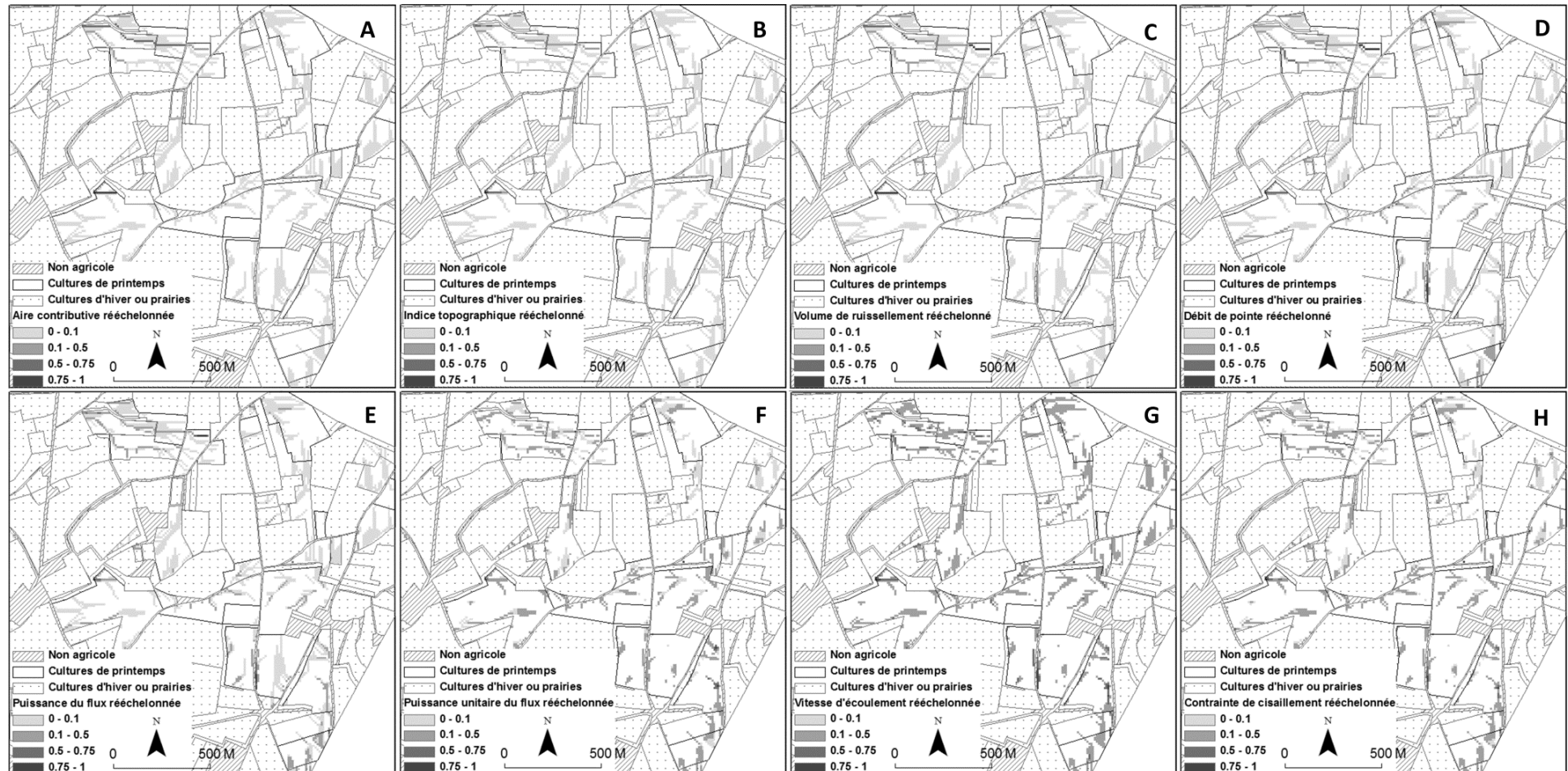
L'Equation 27 devient donc l'Equation 30 qui est également l'Equation 16 :

$$\text{Log}(H) = (0.46 + 10^{-1.00 \text{Log}(r) - 2.18}) \cdot \text{Log}\left(\frac{Q \cdot n}{S^{0.5}}\right) - 0.10 \cdot \text{Ln}(r) - 0.07$$

(Equation 30)

Pour $10 < r < 10\,000$ m, H est estimé avec une précision de moins de 2% pour $0.01 < H < 1$ m

Annexe 10 : Indicateurs topographiques et hydrauliques rééchelonnés de 0 à 1 dans la zone n ° 3 (Figure 34).



Annexe 11: Indicateurs topographiques et hydrauliques rééchelonnés de 0 à 1 dans la zone n ° 8 (Figure 34).

