

GISER

RAPPORT 2016

Ce document présente les activités menées par le projet GISER entre 2015 et 2016, sous forme non technique. Les thèmes sont développés par ailleurs dans un ensemble de rapports scientifiques « stand-alone » et de « fiches-résultat ». Durant cette période, le Service Public de Wallonie, l'Université catholique de Louvain et l'ULg Gembloux Agro-Bio Tech ont uni leurs efforts et leur expertise au sein de la Convention pour la Gestion Intégrée Sol Erosion Ruissellement. La « Cellule GISER » est devenue un pôle de recherche-conseil-expertise, spécialisé dans la lutte contre les inondations par ruissellement et l'érosion des sols agricoles. GISER propose des services à plusieurs niveaux : par un observatoire de la conservation des eaux et des sols, la connaissance et gestion du risque de ruissellement et d'érosion, le renforcement de la capacité des communes à gérer et prévenir les événements de coulées boueuses et enfin des Action de communication, vulgarisation, démonstration.

Projet GISER, UCL-Earth & Life Institute et ULg-Gembloux Agro-Bio Tech, financée par le Service Public de Wallonie.

Rapport mai 2015 - avril 2016.

Rapports « stand-alone » et fiches « résultat » disponibles en annexe de ce document

Avec le soutien de la
Wallonie



Wallonie



Service public
de Wallonie

Remerciements

Les auteurs de projets souhaitent remercier tout particulièrement les Services centraux et extérieurs de la Direction de Développement rural (SPW-DGO3), pour leur soutien logistique, leur approche pragmatique et leur accueil amical. Les Directions de l'Aménagement foncier rural, des Cours d'Eau non navigables et des Espaces verts ont également apporté un concours décisif pour l'accomplissement des missions de GISER : qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude. Le Comité d'accompagnement dans son ensemble a favorisé les échanges et apporté des questions et des éclairages qui ont fait évoluer la convention vers un réel outil de gestion intégrée, en phase avec les besoins de l'Administration et des acteurs de terrain : merci pour leur suivi précis et constructif.

De nombreux partenaires scientifiques ont fourni un appui à nos recherches, leur permettant de s'étoffer, voire parfois simplement, d'exister. Nous pensons spécialement au Centre de Recherche Agronomique de Wallonie (Départements Génie rural et Agriculture et milieu naturel) ainsi qu'à l'AREAS (France) pour la réalisation du simulateur de coulées de boue, au PCNSW pour les sondages pédologiques et l'évolution des sols du bassin expérimental, à nos collègues de l'ULg Gembloux Agro-Bio Tech Département BIOSE (Unités Agriculture de précision, et Gestion des ressources forestières et des milieux naturels) pour l'aide à la caractérisation des fascines et pour les survols du bassin expérimental avec le drone, à la Direction des Recherches hydrauliques du SPW pour la mise à disposition d'un matériel précieux de mesure du débit.

Nos expérimentations ont pu s'ancrer sur des réalités de terrain grâce à l'ouverture de la S.A. Domanoy, des propriétaires, exploitants et garde-chasse du bassin versant d'Hévillers, aux exploitants du bassin versant de Graux, et au personnel du Centre Alphonse de Marbaix de l'UCL pour la mise à disposition du site de démonstration.

La vocation de GISER étant aussi d'être un acteur opérationnel, cela n'a pu se concrétiser avec autant d'efficacité que grâce à la collaboration des communes. Nous remercions tous les agents communaux, éco-conseillers, agents constatateurs, échevins et bourgmestres, qui, par leur confiance et leur volonté d'avancer, ont offert à nos propositions d'aménagements d'être transformés en réalisations concrètes pour la lutte contre les coulées de boue.

Notre cellule souhaite également exprimer sa plus vive reconnaissance aux Contrats Rivière et aux Groupes d'Action Locale pour leur incroyable dynamisme dans les partenariats et la communication en faveur de GISER. Parmi les acteurs de terrain, nous pensons, en outre, aux équipes de conseillers Natagriwal, Nitrawal, Greenotec, AgraOst et CIPF, ainsi qu'à la FWA et à la FUGEA, qui ont facilité à différents niveaux l'articulation de nos missions avec le monde agricole.

Et enfin, justement, la Cellule GISER tient à remercier profondément les agriculteurs qui ont accepté, malgré les incertitudes et les contraintes techniques, d'installer l'un ou l'autre aménagement anti-érosif, ouvrant ainsi une voie très constructive pour la gestion des inondations par ruissellement. Et nous remercions tout autant les agriculteurs qui ont d'abord refusé d'installer les aménagements que nous proposons, dans la mesure où, grâce à leurs arguments et leur analyse, les avis techniques de GISER ont gagné en réalisme et en pertinence.

Adresses de contact

Prof. Aurore Degré
ULg – Gembloux Agro-Bio Tech
Biosystems engineering (BIOSE)
Passage des Déportés 2
5030 GEMBLOUX (Belgium)
aurore.degre@ulg.ac.be

Prof. Charles Bielders
Université catholique de Louvain - UCL
Earth & Life Institute
Croix du Sud 2 – Bte L7.05.02
1348 LOUVAIN-LA-NEUVE (Belgium)
charles.biielders@uclouvain.be

Service Public de Wallonie
DGO3 – Direction du Développement rural
Dir. Abdel-Ilah Mokadem
Avenue Prince de Liège, 7
5100 JAMBES (Belgium)
abdelilah.mokadem@spw.wallonie.be

Rédaction du document

Responsables du projet : Biielders Charles (UCL-ELI), Degré Aurore (ULg Gx ABT)

Personnel du projet : Demarcin Pierre, de Walque Baptiste, Dewez Arnaud, Pineux Nathalie, Staquet Jean-Baptiste, Swerts Gilles.

A. Projet GISER 2015 – 2016 : Rappel des missions

Observatoire de la conservation des eaux et des sols

Élargissement du réseau de BV GISER : Choix et instrumentation d'un second site d'étude en Condroz

Maintenance et exploitation du réseau de BV GISER

Valorisation de la BD SIGISER

Connaissance et gestion du risque de ruissellement et d'érosion

Quantification de l'efficacité des aménagements proposés par GISER

Revue bibliographique sur les différentes méthodes de quantification des processus d'érosion hydrique, dont principalement la redéposition

Caractérisation du risque d'inondation boueuse sur les récepteurs de risque lors d'événements pluvieux intenses

Mise à jour de la cartographie des parcelles à risque d'érosion hydrique

Renforcement de la capacité des communes à gérer et prévenir les événements de coulées boueuses

Analyse des SIGISER

Formation des acteurs communaux

Communication, vulgarisation, démonstration

Action auprès des agriculteurs

Visibilité et communication des résultats

Appui aux politiques régionales

B. Organisation du rapportage

En fonction de l'état d'aboutissement du travail, les résultats sont présentés soit sous forme d'un rapport scientifique in extenso (pour les livrables en cours), soit d'un résumé non-technique (pour les livrables proches de la finalisation). Dans ce dernier cas, un rapport scientifique détaillé est fourni en annexe sous forme d'un 'stand alone'. Certaines parties s'accompagnent également de fiches résultats, disponibles également en annexe.

Observatoire de la conservation des eaux et des sols

Contenu

Élargissement du réseau de BV GISER : Choix et instrumentation d'un second site d'étude en Condroz

Maintenance et exploitation du réseau de BV GISER

Mesures d'érosion sur le bassin versant pilote par l'instrumentation permanente

Mesures d'érosion sur le bassin versant pilote par le drone

Mesures d'érosion sur le bassin versant pilote par des sondages pédologiques

Valorisation de la BD SIGISER

1. Élargissement du réseau de BV GISER

Cette section est présentée ici sous forme de résumé non-technique. Une description détaillée des méthodes et résultats est disponible dans un rapport en annexe :

Rapport stand alone : standaloneGISER2016_Un_second_site_etude_en_Condroz

1.1. Choix et instrumentation d'un second site d'étude en Condroz

La question posée

Le projet prévoyait, dans les missions dévolues à la cellule, la nécessité de mesurer l'érosion dans un autre contexte agropédoclimatique en sus du bassin versant pilote à Chastre.

Le Condroz a été ciblé en priorité car le bassin de Chastre est situé en zone sablo-limoneuse et que le Condroz a été identifié comme la zone la plus sensible à l'érosion, en raison notamment de la faible profondeur de ses sols (Stand Alone GISER 2011-2015 : Détermination des parcelles à risque d'érosion hydrique).

Le résultat actuel

Nous disposons à l'heure actuelle d'un deuxième bassin versant fonctionnel situé à Mettet (plus précisément à Graux). Y sont réalisées en continu :

- ✓ Des mesures de précipitations ;
- ✓ Des mesures de débits d'eau et de débits solides lors du dépassement d'un certain seuil de débit : prélèvement automatique de sédiments à différents exutoires du bassin versant.

La méthode

Le choix du 2^e bassin de GISER s'est basé, parmi les bassins du Condroz, sur des critères d'occupation du sol afin de focaliser sur le phénomène d'érosion agricole. Ainsi, il est situé à plus de 80 % sur terres arables, et présente une très faible proportion de territoires artificialisés et de forêts.

De plus, pour des raisons pratiques, il s'agit d'un bassin qui peut être parcouru raisonnablement en une journée (88 ha), en zone calme avec possibilité de cacher le matériel, et avec une facilité d'accès à l'exutoire pour la pose des appareils ainsi que pour la prise des mesures.

De surcroit, deux points de mesure sont possibles sur ce site : une mesure dans le cours d'eau en aval et une mesure plus haut dans le thalweg.

Enfin, le choix s'est aussi basé sur des critères pédologiques en concertation avec le PCNSW. En effet, ce bassin a beaucoup plus de sols limoneux profonds que de sols G (caillouteux) et de

sols avec substrat (à profondeur très variable) qui tous deux, ne donnent pas/peu d'informations en termes d'érosion lors d'une future comparaison avec la carte de 1956.

Concernant l'instrumentation, après une analyse du marché, de retours d'expériences et du matériel testé sur site, les appareils suivants ont été placés sur le site et effectuent des mesures en continu :

- Un pluviomètre à pesée
- Des mesures de débit sont effectuées et commandent la prise d'échantillons d'eau en 2 points du bassin versant situés sur le chemin des axes d'écoulement. Les différentes instrumentations des points sont localisées à la Figure 1 et les instruments sont illustrés dans les Figure 2 et Figure 3.

Les perspectives

- Tout d'abord, puisque la mise en place d'instrumentations automatiques ne dispense pas d'un suivi quotidien des instruments, deux tâches seront réalisées en continu pour pallier tout problème technique, de connexion ou de dégradation :

- a) Vérification : données manquantes (y a-t-il une donnée à chaque pas de temps ?)

- ou données incorrectes (test de vraisemblance) par des vérifications graphiques ;

- b) Correction, complètement : données à interpoler.

- Les données récoltées pourront être utilisées comme paramètres d'entrée et validation dans les modèles de prédiction mais la durée des enregistrements reste encore relativement courte et l'effort de monitoring doit être maintenu pour permettre d'atteindre cet objectif.

- L'instrumentation d'autres sites de mesure sera envisagée.

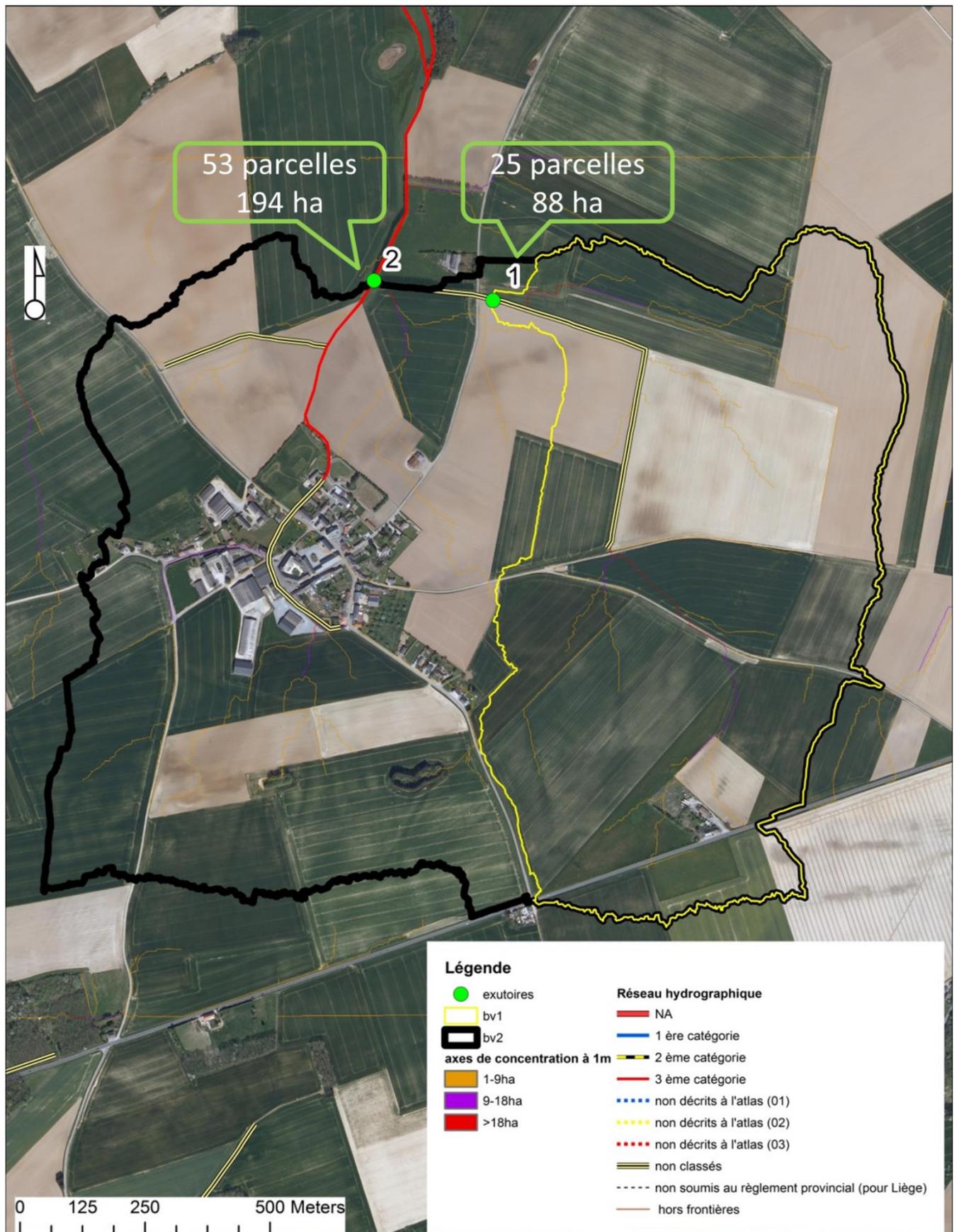


Figure 1 : LOCALISATION DES POINTS INSTRUMENTÉS PAR DES MESURES DE DÉBIT SUR LE 2^E BASSIN GISER



Figure 2 : POINT 1 : CANAL EN INOX AVEC DÉBITMÈTRE COURANTOMÈTRE DOPPLER ACOUSTIQUE (ELSCOLAB SONTEK IQ) + DISPOSITIF DE STOCKAGE ET DE TRANSFERT AUTOMATIQUE DE L'INFORMATION VERS UN SERVEUR PAR MODEM GPRS (CR1000, CAMPBELL) + ÉCHANTILLONNEUR (HACH)



Figure 3 : POINT 2 : SONDE DE HAUTEUR PRESSION PLS (OTT) + CR1000 + ÉCHANTILLONNEUR (HACH)

2. Maintenance et exploitation du réseau de BV GISER

Cette section est présentée ici sous forme de résumé non-technique. Une description détaillée des méthodes et résultats est disponible dans un rapport et une fiche résultat en annexe :

Fiche résultat : [fiche_resultatGISER2016_carto_pedo](#)

Rapport stand alone : [standaloneGISER2016_Mesure_erosion_sondages_pedologiques](#)

2.1. Mesurer l'érosion grâce à une instrumentation permanente

La question posée

Dans le cadre du traitement des données hydrologiques du bassin expérimental de Chastre, le projet proposait de tester la qualité de ces données, leurs erreurs, et ensuite d'établir une séparation des évènements.

Un travail de fin d'étude est en cours de réalisation à ce sujet à Gembloux ABT.

La première analyse devait porter d'abord sur les données de pluie et analyser quelles données utiliser.

Le résultat actuel

Concernant les précipitations, les données de pluie du pluviographe GISER seront utilisées pour la période du 6 mai 2013 au 31 décembre 2015. Pour la période précédente et pour les quelques trous éventuels à combler dans les données de précipitation, les données des stations du réseau PAMESEB (Louvain-la-Neuve et Sombreffe) et la station d'Ernage seront utilisées (distance inverse).

La méthode

Le bassin de Chastre est équipé de deux types de mesure de pluie : une au moyen d'un disdromètre et l'autre au moyen d'un pluviographe.

Le disdromètre recueille des données depuis le 9 mai 2012 mais la récente littérature le renseigne comme sous-estimant les précipitations et ses retours usine (4 au total) créent des lacunes à combler dans les données de pluie. Il reste toutefois précieux pour mesurer l'érosivité des précipitations.

Le pluviographe n'est placé que depuis le 6 mai 2013 mais est un appareil dont le comportement a déjà été amplement étudié et qui présente une continuité dans l'acquisition des données.

Les données enregistrées à la station météorologique de l'IRM située à Ernage (Gembloux) sont, quant à elles, utilisées comme base de comparaison avec nos données enregistrées sur le bassin versant de Chastre.

En mettant en relation les données du disdromètre, du pluviographe, et de la station Ernage (Figure 4), nous observons d'abord une surestimation du disdromètre avant son renvoi en usine le 11/02/2013, et ensuite une sous-estimation par rapport à Ernage et au pluviographe. Celle-ci est également observée à la Figure 5. Cette figure met aussi en évidence la bonne correspondance entre les mesures de la station d'Ernage et celles du pluviographe GISER.

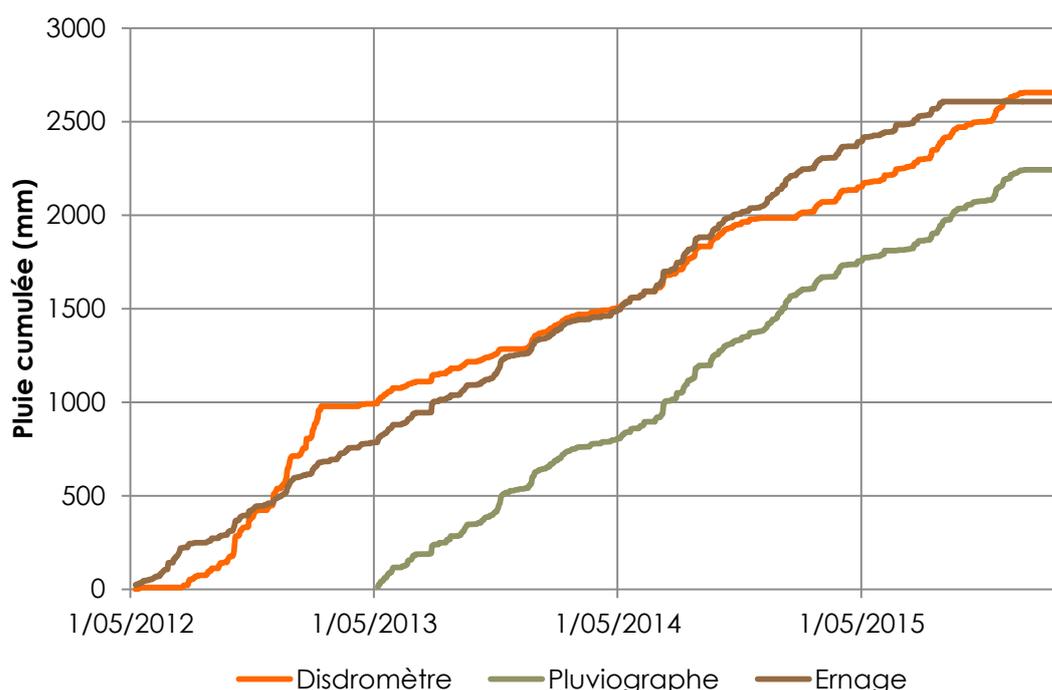


Figure 4 : COMPARAISON DES PRÉCIPITATIONS CUMULÉES ENTRE LE DISDROMÈTRE, LE PLUVIOGRAPHE (MIS EN SERVICE AU 6 MAI 2013) ET LA STATION D'ERNAGE

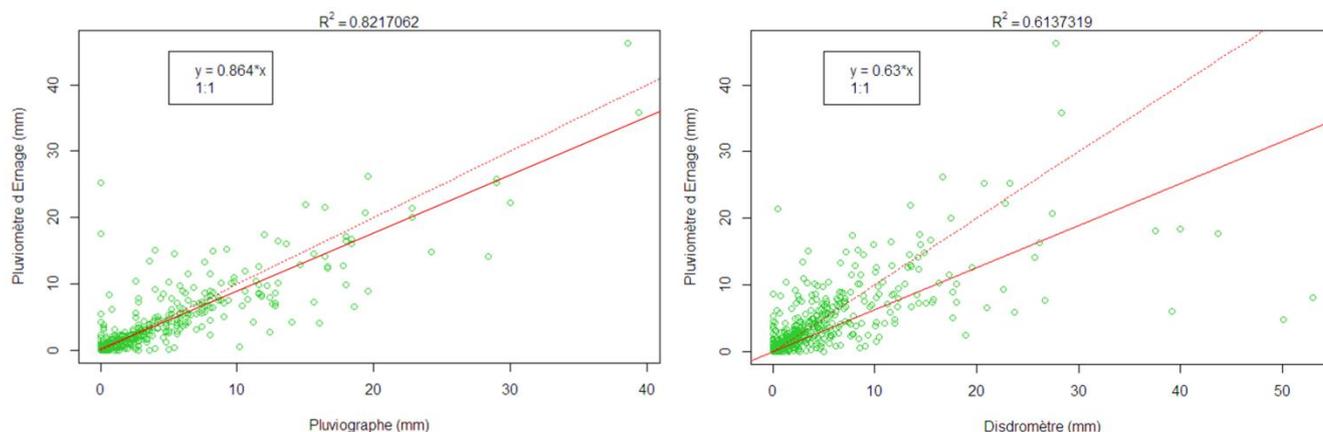


Figure 5 : COMPARAISON JOURNALIÈRE AVEC LA STATION IRM D'ERNAGE ET LE PLUVIOGRAPHE (GAUCHE) ET LE DISDROMÈTRE (DROITE)

Ce sont donc les données de pluie du pluviographe qui seront utilisées pour la période du 6 mai 2013 au 31 décembre 2015.

Mais pour la période précédente et pour les quelques trous éventuels à combler dans les données de précipitation, les données des stations du réseau PAMESEB (Louvain-la-Neuve et Sombreffe) et la station d'Ernage, situées à moins de 10 km à vol d'oiseau, seront utilisées (distance inverse). Les données du pluviographe sont en effet proches de celles de ces stations (Figure 6). De plus, les cumuls des précipitations entre ces 4 appareils sont aussi très proches depuis l'été 2013.

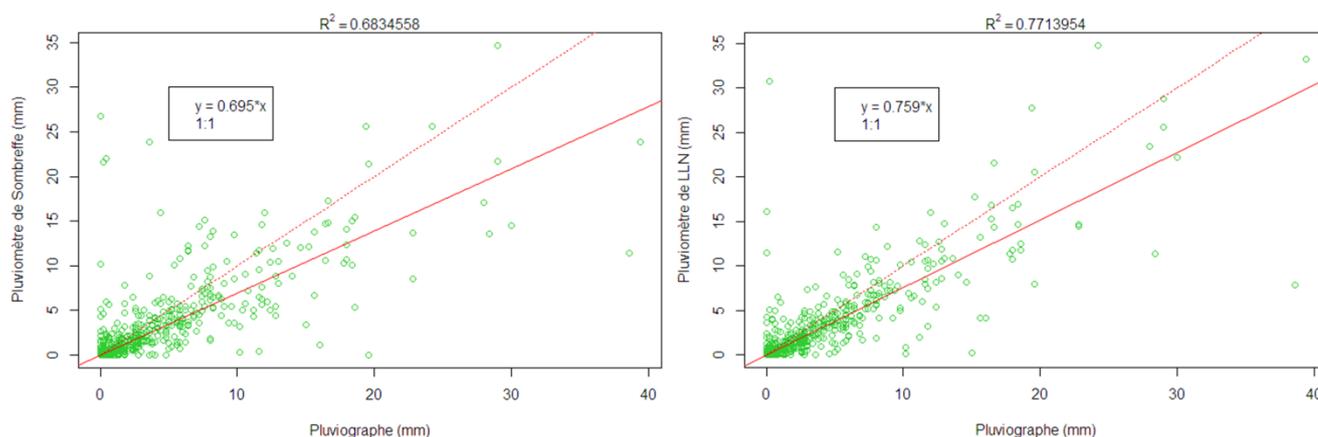


Figure 6 : COMPARAISON JOURNALIÈRE ENTRE LE PLUVIOGRAPHE ET LES STATIONS MÉTÉO DU RÉSEAU PAMESEB ALENTOURS (LOUVAIN-LA-NEUVE ET SOMBREFFE)

Les perspectives

- Mise en relation des hauteurs et des débits en lien avec les opérations d'entretien réalisées autour des sections de mesure ;
- Mise en relation des 2 systèmes de mesure de hauteur d'eau au point 4 ;
- Analyse des séries temporelles des évènements ;
- Mise en relation des pluies et débits (hydrogramme) ;
- Séparation des évènements.

2.2. Mesurer l'érosion grâce à un drone

La question posée

Le projet GISER 2015-2016 prévoyait de poursuivre le monitoring intensif du BV d'Héவில். Faisant partie de ce suivi, le bassin fait l'objet tous les ans, en décembre (la moindre couverture du sol), d'un vol de drone. Le traitement photogrammétrique de ces images permet d'obtenir un modèle numérique de surface du bassin actualisé annuellement.

Le projet sollicitait aussi la valorisation de ces données en termes de publications scientifiques.

Le résultat actuel

Cinq vols à 200 m d'altitude ont eu lieu cette année avec le drone Gatewing X100 afin de couvrir cette fois non seulement le bassin versant expérimental, mais à la fois le bassin versant voisin. 1999 photographies ont ainsi été prises.

De plus, comme en 2011, un vol à 100 m a été opéré sur le bassin versant amont, avec un nouvel outil (le quadricoptère GX8), qui a réalisé 328 photographies de la zone.

En termes de valorisation scientifique, un article sur l'analyse des données précédentes a été envoyé à la revue *Geomorphology*. L'éditeur a demandé d'y apporter des révisions et l'article révisé a été resoumis. La révision est actuellement en cours de traitement par la revue.

La méthode

Les vols ont été réalisés le 2 et 3 décembre 2015 : 2 jours ont été nécessaires car les vols (environ 1h) doivent être réalisés sur le temps de midi pour que le soleil soit au plus haut et ainsi éviter les ombres au maximum.

Puisque la zone était nettement plus grande, le nombre de GCPs (*ground control points*) s'est vu augmenté et la même stratégie que pour les 2 derniers vols a été adoptée : ces points de contrôle ont ainsi été placés à l'extérieur du bassin et sur les routes notamment pour utiliser des surfaces plus permanentes (Figure 7).

Afin de comparer ultérieurement les résultats du vol à 100 m d'altitude réalisé en 2011 sur le bassin amont (2 parcelles, 3,94 ha) avec ceux d'un vol 4 ans plus tard, le quadricoptère GX8 (Figure 8) a été utilisé pour couvrir cette zone, également à 100 m ; la présence d'un minimum de 3 GCPs (règle généralement admise) avait été assurée.

Outre la vérification via les GCPs de la précision du MNS produit par drone, une autre source de mesure comme la photogrammétrie terrestre peut être utilisée à des fins de validation. Ainsi, sur cette zone amont, 3 placettes ont été délimitées par des bandelettes au sein desquelles les croix serviront de GCPs. Ces 3 placettes ont été photographiées en tournant autour d'elles selon différentes orientations et expositions (Figure 9). Dans chacune de ces placettes, 6 GCPs ont été relevés au GPS.

Les perspectives

La constitution d'un recueil de données acquises par le drone permettra d'étudier la validation de la technique pour l'acquisition de MNS sur de plus longues périodes et avec des méthodes variées.

Ces données permettront aussi l'analyse du bassin dans le cadre de l'étude de la connectivité entre parcelles (thèse Gx ABT- Vincent Cantreul).

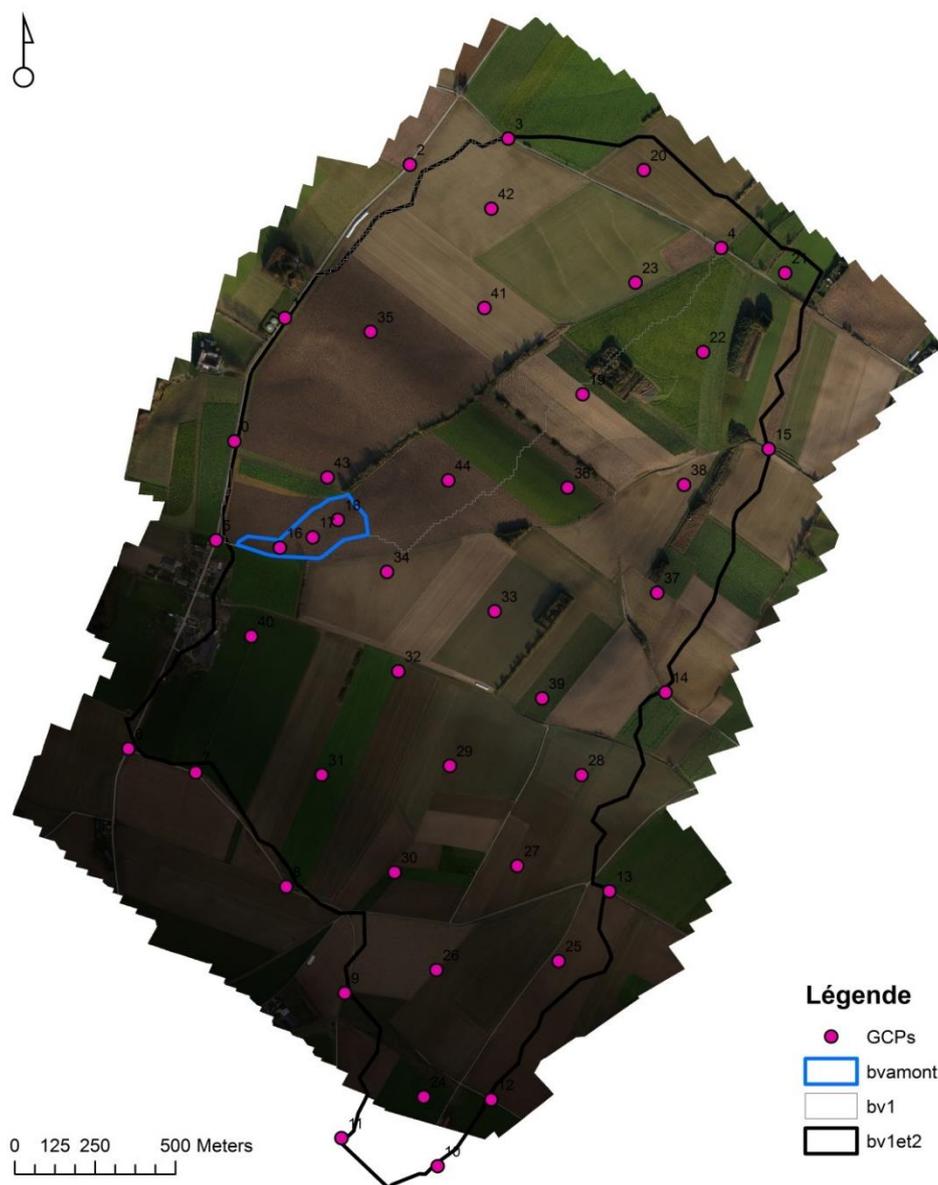


Figure 7 : PLACEMENT DES POINTS DE CONTRÔLE AU SOL SUR L'ORTHOPHOTOMOSAÏQUE CRÉÉE SUR BASE DU VOL DE 2015



Figure 8 : QUADRICOPTÈRE GX8 UTILISÉ POUR LE VOL 100 M D'ALTITUDE



Figure 9 : PHOTOGRAPHIES TERRESTRES PAR ROTATION AUTOUR DE LA ZONE

2.3. Mesurer l'érosion grâce aux sondages pédologiques

La question posée

À nouveau dans un contexte de diversification des outils pour mesurer les changements de relief, l'usage de la carte des sols pour mesurer l'érosion a été envisagé. En effet, la carte des sols du bassin versant de Chastre date de 1956. L'érosion, en enlevant des particules de terre, tronque les profils pédologiques en réduisant l'épaisseur de certains horizons, voire en les supprimant.

Grâce à un nouveau levé pédologique, une comparaison diachronique des cartographies pédologiques à près de 60 ans d'intervalle dans un contexte d'agriculture intensive pourrait permettre de quantifier les pertes en terres et les dépôts de sédiment dans ce bassin versant expérimental. Cette information serait potentiellement une source d'information pour la calibration de modélisation spatiale de l'évolution du paysage.

Le résultat actuel

Lorsque l'on compare les 2 cartes en termes de proportion surfacique des différents types de sol, nous pouvons constater que les sols fortement érodés (AbB) occupent 52 % de la surface, alors qu'ils n'occupaient que 8 % en 1956. Pour ce qui est des zones de dépôts, leur localisation et proportion restent relativement la même. Cependant, des profils érodés colluviaux sont majoritairement observés, présupposant deux types de succession de phases : leurs profils ont d'abord été tronqués sous l'action de l'érosion, puis, le relief s'étant creusé, les colluvions s'y sont déposées. Cela signifie que l'on assiste sur des temps relativement courts, à des redistributions de terres relativement importantes au sein du BV, et par conséquent à des modifications significatives du relief.

Par ailleurs, lorsque l'on compare les 2 cartes afin d'obtenir une estimation de taux d'érosion, deux cas peuvent être envisagés :

- Dans le cas des valeurs minimales d'érosion et celles de dépôt maximum, nous observons une érosion minimale de $10 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (0.7 mm.an^{-1}) : 271.000 tonnes érodées pour 205.000 tonnes redéposées sur le bassin en 58 ans ;
- Dans le cas des valeurs maximales d'érosion et celles de dépôt minimales, nous observons une érosion maximale de $65 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (5 mm.an^{-1}) : 549.000 tonnes érodées pour 113.000 tonnes redéposées sur le bassin en 58 ans.

Cette méthode d'observation indirecte entre le sigle pédologique actualisé et le sigle de la carte des sols établie en 1956, a clairement montré des pertes de la couche arable du sol, mais aussi d'une partie de l'horizon enrichi en argile, possédant des propriétés de rétention en eau et en nutriment essentiel pour la bonne croissance des cultures.

Par ailleurs, cette méthode originale permet la spatialisation des phénomènes d'érosion et de dépôt à l'échelle d'un bassin versant. Si les quantifications parfaitement exactes sont impossibles, le fait de disposer d'observations différées de 60 années dans le temps permet d'illustrer assez clairement les tendances dans le bassin versant et ouvre les portes d'une modélisation de paysage permettant de prévoir l'évolution future du relief.

Ces mesures pourraient s'étendre à l'ensemble de la région limoneuse de moyenne Belgique pour identifier si ce phénomène est lié à une zone ou s'il est généralisé.

La méthode

Nous nous sommes d'abord assurés de l'occupation du sol agricole constante depuis le levé de la carte pédologique en 1956, par un historique de différents documents de l'époque (orthophotoplan et IGN), confirmé par le texte explicatif de la planchette de la carte des sols.

Ceci fait, la campagne de sondages pédologiques a été réalisée avec la précieuse collaboration de l'équipe du PCNSW. Elle a commencé en juin 2014, en privilégiant les périodes d'assèchement/réhumidification du sol. Elle a été finalisée en 2015, au fur et à mesure que le cycle cultural le permettait.

Les sondages ont été effectués par zone en fonction des cultures et de manière systématique, à raison de 4 points par hectare (un tous les 50 mètres) mais avec un maillage parfois plus large ou parfois moins large en fonction des observations précédentes. Au total, 517 points ont été réalisés.

Vu les imprécisions de la localisation des limites des plages pédologiques (principalement dues au passage d'un plan à une carte et au changement du système de projection), le choix s'est plutôt porté sur une comparaison des recouvrements surfaciques des plages de sigles plutôt que des sondages ponctuels. L'évolution de chaque sigle en termes de proportion surface des sigles a été relevée (Figure 10 et Figure 11), telle que :

- L'essentiel des Aba (sols non érodés ou soumis à faible érosion) s'altère en AbB (sols soumis à une forte érosion) et seuls les sommets du bassin semblent rester en Aba. Certaines zones en amont, deviennent toutefois des zones de dépôt ;
- Les zones les plus à risque à l'époque sont en grande partie restées de même sigle, avec une tendance à la dégradation, sauf pour certains zones bordant le thalweg sur lesquelles les zones de dépôt se sont élargies ;
- La zone de colluvions Abp0 (colluvions sur toute la profondeur du profil) dans le thalweg reste sensiblement au même endroit. Les zones de colluvions moins épaisses le bordant passent de drainage favorable à modéré dans l'amont du bassin. Certaines de ces zones moins épaisses ont soit des dépôts plus élevés, ou sont transformées en zone érodées ou de dépôt mais ayant subi de l'érosion entre-temps. En effet, des profils érodés colluviaux sont abondamment rencontrés dans le bassin, deux types de succession de phases ayant eu lieu. Au fil du temps et sous l'action de l'érosion, la couche initiale de colluvions aurait été tronquée, la profondeur d'apparition du Bt a diminué, et finalement l'horizon d'accumulation de colluvions a disparu. L'érosion s'est poursuivie et a érodé suffisamment l'horizon Bt pour que, à ce jour, l'horizon C sous-jacent soit visible (donc situé à une profondeur inférieure à 120 cm). L'érosion a ensuite été remplacée par un phénomène d'accumulation de colluvions. Cela souligne la nécessité d'utiliser, pour la modélisation, des modèles qui prennent en compte ces modifications de relief. Cette succession de phase est présentée à la Figure 12 et Figure 13.
- Pour les zones où le substrat apparaissait à faible profondeur, elles restent sensiblement au même endroit (bordant la partie nord des colluvions en aval). Cependant, aucune

information n'est disponible pour traiter ces symboles en termes d'érosion. En effet, pour les substrats, les chiffres en fin de symbole servent à indiquer à quelle profondeur apparait ce substrat et non quand apparait le Bt. Ces sigles sortent du contexte limoneux classique. Dans ces sols, puisque le passage du A au L est subtil, ces deux symboles ont été considérés indistinctement (A=L), la difficulté étant la même actuellement que pour les cartographes de l'époque.

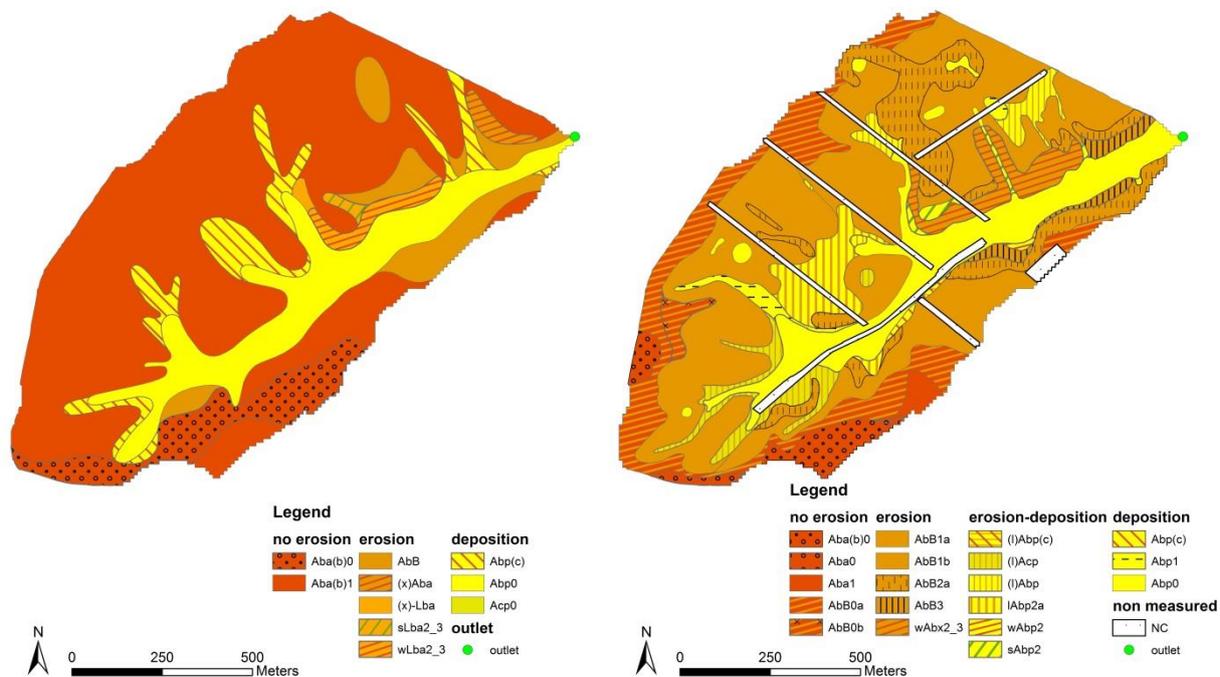


Figure 10 : CARTE PÉDOLOGIQUE DE 1956 (GAUCHE) ET DE 2015 (DROITE)

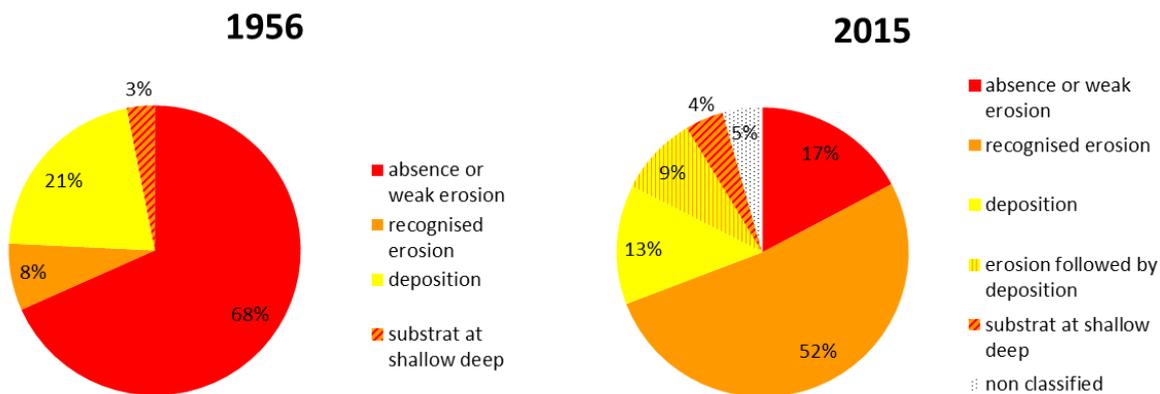


Figure 11 : REPRÉSENTATION SURFACIQUE DES TYPES DE SOLS SUR LE BASSIN VERSANT DE CHASTRE

Pour l'estimation des taux d'érosion, une fois les différences de hauteur établies entre 1956 et 2015, les plages ont été converties en volume. Pour le calcul de l'exportation en sédiments hors du bassin en $T \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$, considérant la superficie 116 hectares du bassin, une densité de sol de $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a été utilisée. Cette valeur de densité de $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a été choisie sur base de l'étude de sols cultivés de la ceinture limoneuse belge de Kader et al. (2010) qui a mesuré cette valeur

minimale dans deux sols de Court-Saint-Etienne. Il s'agit donc également d'une densité minimale. Les volumes totaux mobilisés ont aussi été relevés pour rappeler que les taux d'érosion ne prennent pas en compte le fait que des sols qui ont été mobilisés n'ont plus la même stabilité structurale.

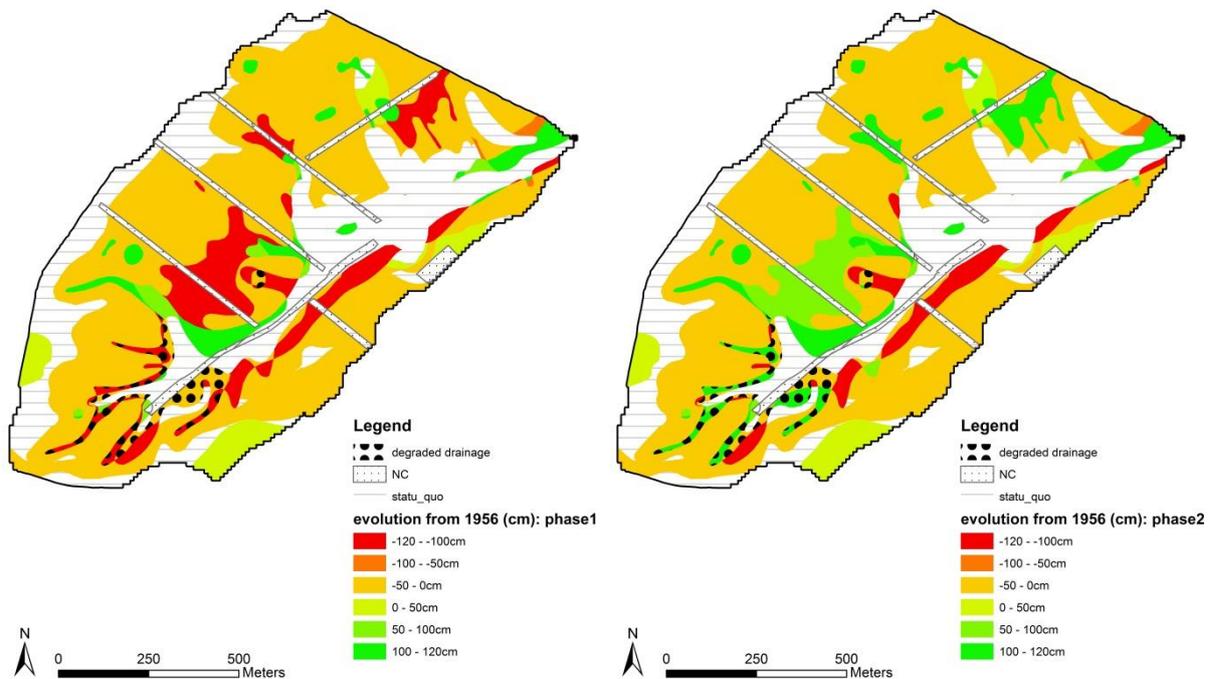


Figure 12 : ÉVOLUTION DU PAYSAGE DEPUIS 1956 (SITUATION LA PLUS FAVORABLE)

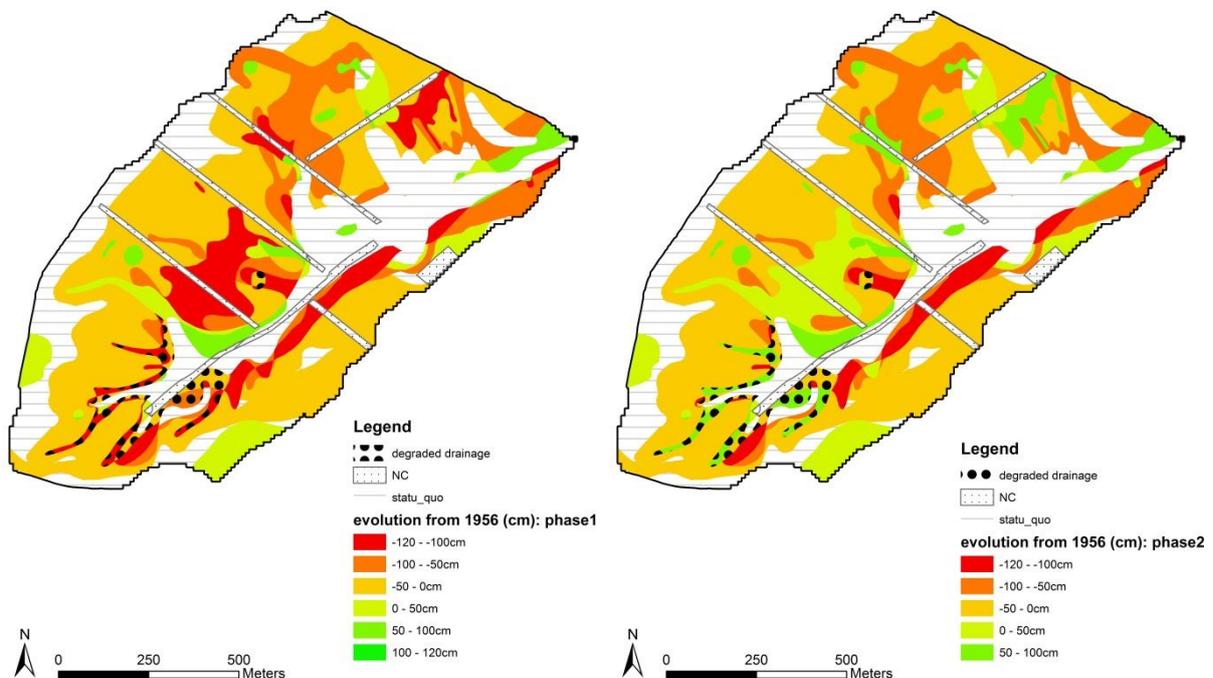


Figure 13 : ÉVOLUTION DU PAYSAGE DEPUIS 1956 (PIRE SITUATION EN TERMES D'ÉROSION)

Les perspectives

Une publication scientifique est en cours de réalisation en collaboration avec l'équipe du PCNSW pour valoriser ce travail.

Par ailleurs, comme la carte des sols de la Belgique est réalisée sur l'ensemble de ce territoire avec une légende homogène, ces mesures pourraient s'étendre à l'ensemble de la région limoneuse de moyenne Belgique pour identifier si ce phénomène est lié à une zone ou s'il est généralisé. C'est la raison pour laquelle un autre bassin choisi dans un contexte agropédoclimatique différent en Condroz (voir GISER_Rapport2016_Un_second_site_d'étude_en_Condroz) va faire l'objet d'une campagne actualisée similaire *a posteriori*.

3. Valorisation de la base de données SIGISER

3.1. Résumé

La valorisation de la base de données SIGISER a pour but l'identification des causes et facteurs à l'origine des SIGISER identifiés.

Afin de définir les causes, trois méthodologies d'analyse sont proposées à la fin de cette convention :

- Une analyse basée sur la récurrence des inondations
- Une analyse par paires de bassins versants en y intégrant des facteurs constatés sur le terrain
- Distribution de fréquence des facteurs constatés sur le terrain

La première technique demande une partie d'enquête auprès des riverains. Les deux suivantes demandent d'encoder les facteurs constatés sur le terrain repris dans la partie diagnostic des rapports d'expertise GISER.

Actuellement la base de données SIGISER n'intègre aucun de ces éléments. Pour rappel, la base de données SIGISER a été développée comme outil de suivi des demandes des communes et de monitorings des sites aménagés.

3.2. Introduction

Actuellement, la base de données des zones de production de ruissellement, appelé Sites d'Intérêts GISER (repris sous l'acronyme SIGISER), est composée de presque 400 SIGISER. Cette source de données devient conséquente et peut permettre de comprendre pourquoi ces sites ont un jour posé problème. Ce chapitre comprend la mise en place d'une méthodologie de valorisation de la base de données SIGISER afin de comprendre quels sont les facteurs favorisant l'inondation d'un site.

3.3. Proposition de méthodologie

Les méthodologies pour définir la causalité des inondations pourraient être les suivantes :

✓ *Une analyse sur le caractère récurrent des événements*

La récurrence exprime le nombre de fois qu'un site a subi une inondation boueuse. Elle permet de mettre en évidence la dangerosité du site. C'est un élément intéressant pour définir le niveau de priorité du site pour la mise en place d'aménagements.

Cette information est-elle disponible ? En l'état actuel des choses, la partie expertise de GISER ne reprend pas les informations liées à la récurrence de l'événement. Les communes ne fournissent que très rarement la (les) date(s) exacte(s) d'inondation.

Que faudrait-il faire :

- 1) Demander à la commune de fournir les dates des différents événements observés sur les sites lors de la demande des coordonnées XY des zones de dégâts.
- 2) Prendre le temps d'une enquête auprès des riverains touchés afin d'approcher le nombre de fois où le site a réellement connu une inondation. Un formulaire d'enquête devrait donc être conçu. À la manière de l'approche entreprise lors de la première convention AGIRACAD.
- 3) Adapter la base de données.

✓ *Une analyse par paire de bassins versants*

L'analyse par paire de bassins versants correspond à une comparaison d'un bassin versant ayant connu une inondation par rapport à un autre bassin versant (supposé) sans problème. Cette démarche est déjà entreprise dans le chapitre « Caractérisation du risque d'inondation boueuse sur les récepteurs de risque lors d'événements pluvieux intenses » de Baptiste de Walque avec une analyse basée sur la connectivité au sein d'un bassin versant. Il pourrait être possible d'enrichir cette analyse par paire sur base des facteurs (position de l'habitat, présence d'éléments de protection, etc. (voir Tableau 1) constatés sur le terrain.

Cette information est-elle disponible ? Les facteurs sont identifiés dans la partie diagnostique des rapports d'expertise GISER. Ces éléments ne sont pas actuellement présents dans la base de données des SIGISER.

Que faudrait-il faire :

- 1) Adapter la base de données afin de recueillir ces informations
- 2) Encoder ces renseignements

✓ **Une analyse des distributions des facteurs**

La distribution des facteurs constatés permettra de mettre en évidence quel facteur est généralement le plus présent lors de l'inondation d'un site.

L'information nécessaire et ce qu'il faudra mettre en place sont les mêmes que dans la méthodologie précédente.

Les trois propositions méthodologiques sont possibles, selon le temps imparti et l'objectif fixé par le comité d'accompagnement.

Les facteurs les plus fréquemment constatés sur le terrain sont repris et classés dans le Tableau 1. Pour la suite de l'analyse, ils sont regroupés par thème et associés objectivement à un ou plusieurs acteurs des coulées de boues (commune, riverain, agriculteur et le contexte environnemental). Le fait d'associer le facteur à un ou plusieurs des acteurs concernés dans le ruissellement boueux permettra de définir des recommandations ou réglementations générales ciblées par rapport à ces acteurs (fiches technique, guide de bon voisinage, etc.).

Facteurs liés	Constat	Effet positif (+) et/ou négatif (-)	Acteurs			
			Commune / service public	Riverain(s)	Agriculteur(s) (ou pratique agricole)	Sensibilité physique (historique, topographie, ...)
Aux voiries	<ul style="list-style-type: none"> Chemin en position de thalweg ou reprenant le ruissellement Chemin creux Voirie en remblais avec ou sans aqueduc ou pertuis Mètre d'accotement, les crêtes de talus 	Dévie, sert de canal (-)				X
		Dévie ; manque d'entretien (recépage régulier des arbres, ...), pulvérisation --> rend plus sensible (-)	X			X
		Sert de barrage (ou peut servir), dévie (+) / concentre, dévie (-)	X			
		Respecté (+) / non respecté (-)			X	
À la récupération du ruissellement	<ul style="list-style-type: none"> Fossé(s) ou cunettes Grille transversale Aqueduc ou pertuis 	Entretenu (+) / manquant d'entretien ou labouré ou mis sous tuyaux (-)	X	X	X	
		Diminue les longueurs de pente, draine, conduit mieux (+) / accélère et/ou concentre à un endroit (-)	X			X
		Entretenu (+) / manquant d'entretien (-)	X			
		Entretenu (+) / manquant d'entretien (-)	X			
À la protection	<ul style="list-style-type: none"> Fossé, fossé-talus, talus, mur(et), dos d'âne vers l'accès au garage ou parking, sacs de sable, sillon profond Muret en U autour du soupirail Calfeutrage du soupirail Batardeaux, présence de glissière, porte murée Filet ou géotextile sur les clôtures ou planches tressées 	Conduit mieux, dévie en maintenant la servitude (+) / change la servitude, dévie, reporte, accélère, concentre en un point, stocke, cède (-)	X	X	X	
		Protège, maintient la ventilation de la cave (+)		X		
		Protège (+) / sans maintenir la ventilation de la cave (-)		X		
		Protège (+)		X		
		Ralentit, "filtre" (+) / dévie, reporte, stocke, cède (-)		X		
Aux contacts riverains - zone agricole	<ul style="list-style-type: none"> Tontes de pelouses, branchage, ... 	Enrichit en MO le sol (+) / empêche la culture de pousser, peut servir d'embâcle pour des aménagements en aval, détériore les relations riverains-agriculteurs (-)		X		
Aux parcelles agricoles	<ul style="list-style-type: none"> Longueur de pente, pente, taille des parcelles Répartition des cultures sur le bassin versant Coin ou entrée de champs en entonnoir Mare Lignes de pulvérisation État de surface du sol Prairie (de fond de vallon, de versant sous forte pente, ...), verger 	Gestion du parcellaire (coupé par des bandes enherbées, division du bloc, ...), maintien des talus et d'autres éléments fixe du paysage (+) / des longueurs de pente > 300 m, des pentes > 7 %, parcelles > 20 ha, le labour des talus, des chemins et d'autres éléments fixe du paysage (-)			X	X
		Entente entre agriculteur pour ne pas mettre tout en culture de printemps (+) / phasage des rotations ou assolement où la céréale ne revient pas souvent (-)			X	
		Mise en place d'aménagements (triangle enherbé, fascine, ...), apport de terre de pommes de terre ou autre pour combler le départ dû au travail du sol (+) / laisser accentuer le phénomène du au travail du sol, accentuer volontairement pour drainer la parcelle (-)			X	X
		Maintien (+) / remblai (-)			X	
		Dévie, accélère, concentre (-)			X	
		Présence de motte, travail du sol grossier (+) / sol glacé, travail du sol fin, absence de levée, compaction, présence de "lanière" dans la bande retournée d'un labour (-)			X	
		Maintien (+) / labour (-)			X	
					X	
À l'urbanisme	<ul style="list-style-type: none"> Position de l'habitat 	Positionnement ou adaptation du terrain afin de protéger la maison (+) / positionnement à risque sans réflexion (-)	X	X		X

Tableau 1 : Facteurs constaté lors de l'analyse d'un site sur le terrain

Connaissance et gestion du risque de ruissellement et d'érosion

Contenu :

Quantification de l'efficacité des aménagements proposés par GISER

Recensement des fascines wallonnes et mesure de leurs performances

Le miscanthus (*Miscanthus. giganteus*), nouvelle piste anti-érosive ?

Le simulateur de ruissellement : tests d'efficacité de barrages filtrants

Revue bibliographique sur les différentes méthodes de quantification des processus d'érosion hydrique, dont principalement la redéposition

Caractérisation du risque d'inondation boueuse sur les récepteurs de risque lors d'événements pluvieux intenses

Mise à jour de la cartographie des parcelles à risque d'érosion hydrique

4. Quantification de l'efficacité des aménagements proposés par GISER

4.1. Recensement des fascines wallonnes et mesure de leurs performances

4.1.1. Résumé

Depuis plusieurs années, la partie « expertise » de la cellule GISER propose la mise en place de fascines. Il a été jugé opportun de compléter notre base de données les concernant, avec des informations actuelles, issues d'un suivi de leur état. Un premier tour des fascines wallonnes a été effectué en été 2015. Il a pu être établi que six fascines ont été mises à contribution et ont retenu chacune entre 0,5 T et 1,7 T. La base de données pourra être actualisée et complétée. En outre, des recommandations ont été adressées aux communes lorsque l'état des fascines nécessitait un entretien urgent.

Les fascines de branchages de type 'morte' sont largement majoritaires (83 % du total), devant les fascines de branchages de type 'vives' (9 %) et les fascines de pailles (8 %).

Un second tour sera programmé pour l'été 2016, afin d'ajouter une dimension temporelle aux observations. La vitesse de vieillissement des fascines sera également étudiée lors de ces prochaines visites, et les nouvelles fascines installées depuis lors pourront être intégrées à la base de données.

4.1.2. Objectifs poursuivis

Depuis quelques années des fascines sont installées en Wallonie, sous le conseil de la cellule d'expertise GISER, de la DAFor ou parfois de certains entrepreneurs. Il a été jugé opportun de faire un état des lieux de leurs positions, leurs états et – le cas échéant – de leurs performances en termes de retenue de sédiments. Un suivi individuel a été entrepris afin de contrôler l'obsolescence des fascines mises en place.

4.1.3. Visites de terrain et prises de mesures

Les fascines à visiter ont été identifiées d'après la base de données GISER au 1^{er} février 2015.

Les visites de terrains avaient pour but de déterminer l'état des fascines, ainsi que leurs caractéristiques physiques. Chaque fascine a donc été mesurée, examinée afin de déterminer son état général et de repérer ses éventuels défauts (affouillements, imperfections, dégradations, tassement...). Les caractéristiques étudiées sont présentées au Tableau 2. En

outre, la présence de sédiments en amont de la fascine – révélant leur bon fonctionnement – a été consignée et mesurée.

Tableau 2 : CARACTÉRISTIQUES ÉTUDIÉES LORS DES VISITES DE TERRAIN

- Localisation géographique : coordonnées, pente, culture en place
- Type de Fascine : vivante, morte, paille, ...
- Caractéristiques physiques : longueur, largeur, hauteur amont, diamètre des branches
- Forme : droite, coudée, en 'L', en 'U'.
- Isolée ou multiples
- Position : bordure de champs, bord de fossés ou chemin creux, sur talus, associés à une bande enherbée, ...
- État : état général, défauts (entretien, tassement, colmatage, affouillement,...)
- Erosion : traces d'érosion, de dépôt

✓ Détermination de la masse de terre retenue par une fascine

Pour pouvoir déterminer la masse de sédiments retenue par les fascines, il est nécessaire de mesurer en différents points l'épaisseur de la couche de sédiments déposés en amont de la fascine. Un volume de dépôt peut alors être calculé (Équation 1).

$$V_{\text{dépot}} = \sum_i e_i * S_i \quad (1)$$

Avec :

$V_{\text{dépot}}$	[m ³]	Le volume de dépôt
e_i	[m]	L'épaisseur de la couche de sédiment mesurée en un point
S_i	[m ²]	La surface couverte par un point de mesure

La prise d'échantillons en structure conservée au moyen de kopeckis (anneaux volumétriques de 25 et 100 cm³) en trois points permet d'obtenir la densité volumique moyenne. La masse de sédiment retenue se calcule facilement d'après le volume et la densité mesurés (Équation 2).

$$M_{\text{sédiments}} = \rho_{\text{moyen}} * V_{\text{dépot}} \quad (2)$$

Avec :

$M_{\text{sédiment}}$	[T]	La masse de sédiment retenu
ρ_{moyen}	[T.m ^{-1/3}]	La densité volumique moyenne

Une description détaillée de la méthodologie peut être trouvée dans le rapport GISER 2011-2015.

4.1.4. Résultats obtenus et statistiques descriptives

91 fascines ont été visitées, du 11 juin 2015 au 30 juillet 2015. Elles sont réparties sur douze communes (Beauvechain – Braine-le-Comte – Braives – Chastre – Court-St-Etienne – Ecaussinnes – Jodoigne – La Hulpe – Orp-Jauche – Ottignies-Louvain-la-Neuve – Rebecq – Thuin).

La grande majorité (83 %) de nos fascines est de type « morte ». C'est en effet la proposition de l'équipe expertise de la cellule GISER qui est le plus souvent acceptée par les acteurs impliqués. 9 % des fascines sont de type 'vive' et les 8 derniers pourcents sont dites « de paille ».

✓ *Caractéristiques physiques*

Cette campagne de terrain a fourni une première approche globale de l'état et des caractéristiques des fascines wallonnes. Ainsi, un peu plus de 2 km de fascines mortes ont été visitées, ainsi que 175 m de fascines de paille et 265 m de fascines vivantes. Nous pouvons remarquer que, d'après le Tableau 3, les trois types de fascines ont des longueurs moyennes semblables mais que les fascines de paille ont des épaisseurs et hauteurs plus faibles que les fascines de branchages – vivantes ou mortes. Concernant la longueur minimale de 0,8 m des fascines de paille, il s'agit d'une fascine placée comme redent dans un fossé enherbé, ce qui explique sa faible longueur. De même, pour les fascines mortes, la hauteur amont minimale de 0 m s'explique par une fascine totalement enterrée au moment de la visite.

Tableau 3 : MOYENNE, ÉCART-TYPE, MAXIMUM ET MINIMUM DE LA LONGUEUR, L'ÉPAISSEUR ET LA HAUTEUR DE CHAQUE TYPE DE FASCINES

	Fascines mortes				Fascines vives				Fascines de paille			
	moy.	écart-type	max	min	moy.	écart-type	max	min	moy.	écart-type	max	min
Longueur [m]	26,6	22,1	111	2,5	33,6	26,1	72	2,5	25,1	48,2	129	0,8
Epaisseur [m]	0,37	0,1	0,75	0,2	0,39	0,1	0,5	0,25	0,2	0,06	0,3	0,1
Hauteur [m]	0,38	0,14	0,75	0	0,42	0,12	0,7	0,3	0,24	0,07	0,35	0,2

Une méthodologie d'appréciation de l'état des fascines a été mise au point afin de pouvoir attribuer une note de 0 à 5 à chaque fascine, 0 étant un très mauvais état (fascine à remplacer) et 5 un très bon état. Cette appréciation repose sur des critères qualitatifs observables comme le tassement des branches (ou de la paille), la solidité de la fascine, la présence d'affouillement et le colmatage.

Ainsi, une valeur de 0 est donnée aux fascines presque inexistantes vu leur état de délabrement avancé, comme illustré à la Figure 14. Ces fascines doivent être complètement recommencées si nous souhaitons les rendre efficace à nouveau.



Figure 14 : FASCINES MORTE OBTENANT UNE VALEUR DE 0 POUR SON ÉTAT

Par contre, une valeur de 5 est attribuée aux fascines bien propres, bien tassées, bien réalisées et correctement mise en place comme celle présentée à la Figure 15. Ces fascines sont généralement très récentes ou n'ont pas encore été sollicitées par une coulée boueuse ni abîmées par un passage d'engin agricole.



Figure 15 : FASCINE MORTE OBTENANT UNE VALEUR DE 5 POUR SON ÉTAT

La Figure 16 montre pour chaque valeur de cette échelle le nombre de fascines prenant cette valeur. D'après celle-ci, les fascines wallonnes sont en bon état pour le moment.

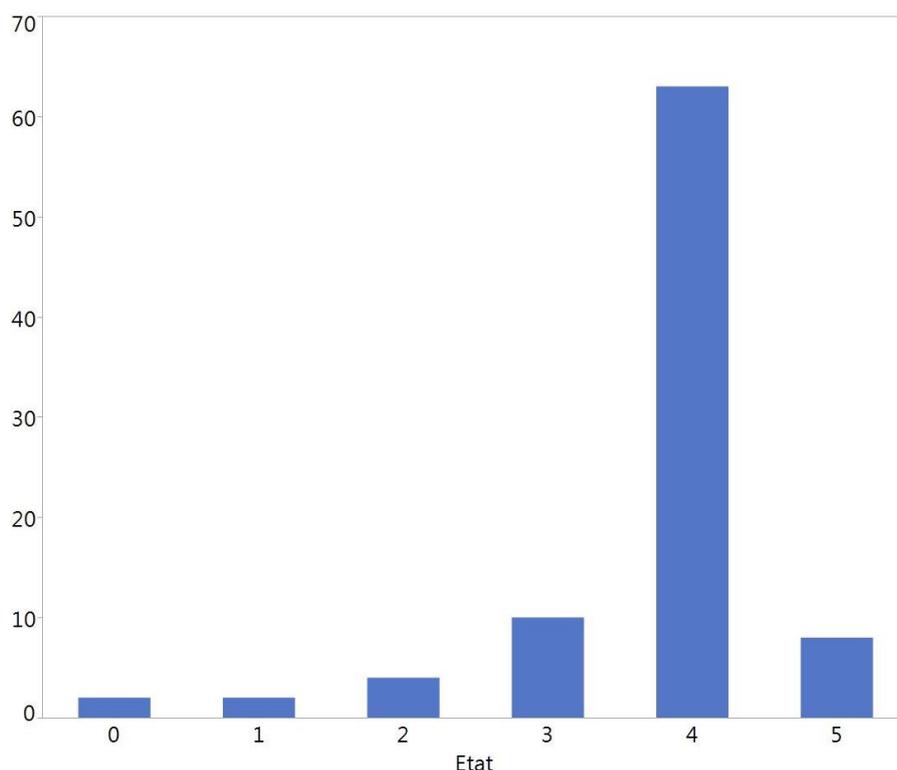


Figure 16 : NOMBRE DE FASCINES RÉPERTORIÉES EN FONCTION DE LEUR ETAT ÉVALUÉ SUR UNE ÉCHELLE DE 0 (TRÈS MAUVAIS ÉTAT) À 5 (ÉTAT EXCELLENT)

Tableau 4 : POURCENTAGE DE FASCINES RELEVÉ DANS CHAQUE POSITION – EN MILIEU DE PARCELLE, BORD DE PARCELLE (COIN DE CHAMP, ASSOCIÉ À UN ENHERBEMENT, EN BORDURE DE FOSSÉ/CHEMIN CREUX, OU AUTRE) OU COMME REDENT DANS UN FOSSÉ. La somme des fascines peut dépasser 100 %. Certaines fascines de bord de parcelle pouvant combiner plusieurs caractéristiques.

Milieu de parcelle	Bord de parcelle				Redent	Nombre de fascines
	Coin	Enherbement	Fossé-Chemin creux	Autre		
7 %	11 %	19 %	30 %	36 %	8 %	91

La position de chaque fascine a également été caractérisée, selon trois critères distincts (Tableau 4). D'une part la situation 'géographique' de la fascine par rapport à la parcelle : milieu ou bord de parcelle, ou sous forme d'un redent dans un fossé. D'autre part, selon la proximité à d'autres fascines : fascines isolées ou multiples (si plusieurs fascines sont placées parallèlement). Enfin si la fascine est en bord de parcelle, sa position est caractérisée d'après les éléments qui l'entourent : bande enherbée, fossé/chemin creux, coin de champs, autre.

La majorité des fascines (81 %) sont placées de façon isolée ; 19 % des fascines sont disposées parallèlement à d'autres fascines, pour intercepter le flux successivement. Les fascines sont principalement placées en bord de parcelle (85 %) ; elles sont associées à un enherbement dans 19 % des cas observés.

Du point de vue de leur forme, plus de 80 % des fascines sont rectilignes, quel que soit le type de fascine considéré. Le Tableau 5 reprend pour chaque type de fascine le pourcentage de chaque forme observée sur le terrain.

Tableau 5 : POURCENTAGE DE FASCINES DE CHAQUE FORME
(COUDÉE, RECTILIGNE, EN 'L' OU EN 'U') SELON SON TYPE (MORTE, VIVANTE OU DE PAILLE)

Type	Fascines mortes				Fascines vivantes		Fascines de paille	
Forme	<i>Coudée</i>	<i>Droite</i>	<i>En 'L'</i>	<i>En 'U'</i>	<i>Droite</i>	<i>En 'L'</i>	<i>Droite</i>	<i>en 'U'</i>
		12 %	82 %	1 %	5 %	87 %	13 %	86 %

Ensuite, d'après le MNT de la Wallonie (10 m de résolution), les fascines wallonnes sont présentes sur des pentes allant de 0 à 6 % avec une pente moyenne de 2,4 % et un écart-type de 1,3 %. Ces valeurs seront affinées par la seconde visite de terrain l'été prochain. Leurs aires contributives vont de 100 m² à 92 ha, la médiane est 600 m², la moyenne 4 ha et l'écart-type 14 ha. Elles sont donc très variables d'une fascine à l'autre, avec des valeurs très grandes ou très petites. Cela est probablement dû en partie à la précision limitée du MNT utilisé. L'utilisation du MNT Lidar devrait permettre d'améliorer ces estimations à l'avenir.

La Figure 17 met en relation l'état des fascines et la date de réalisation de celles-ci (lorsque cette information est disponible dans la base de données GISER). Il se fait que les 37 fascines pour lesquelles la date de réalisation est connue sont principalement à Jodoigne et Orp-Jauche. En outre, aucune des fascines dont la date de réalisation est connue n'obtient un état de 5.

La date de réalisation est exprimée sous la forme « AAAA.MM ». Notons enfin que l'échelle temporelle s'étend de 2012 à fin 2014 ; les fascines les plus récentes ont 6 mois lors de la visite.

La tendance globale semble bien confirmer qu'au plus une fascine est âgée, au plus son état est mauvais.

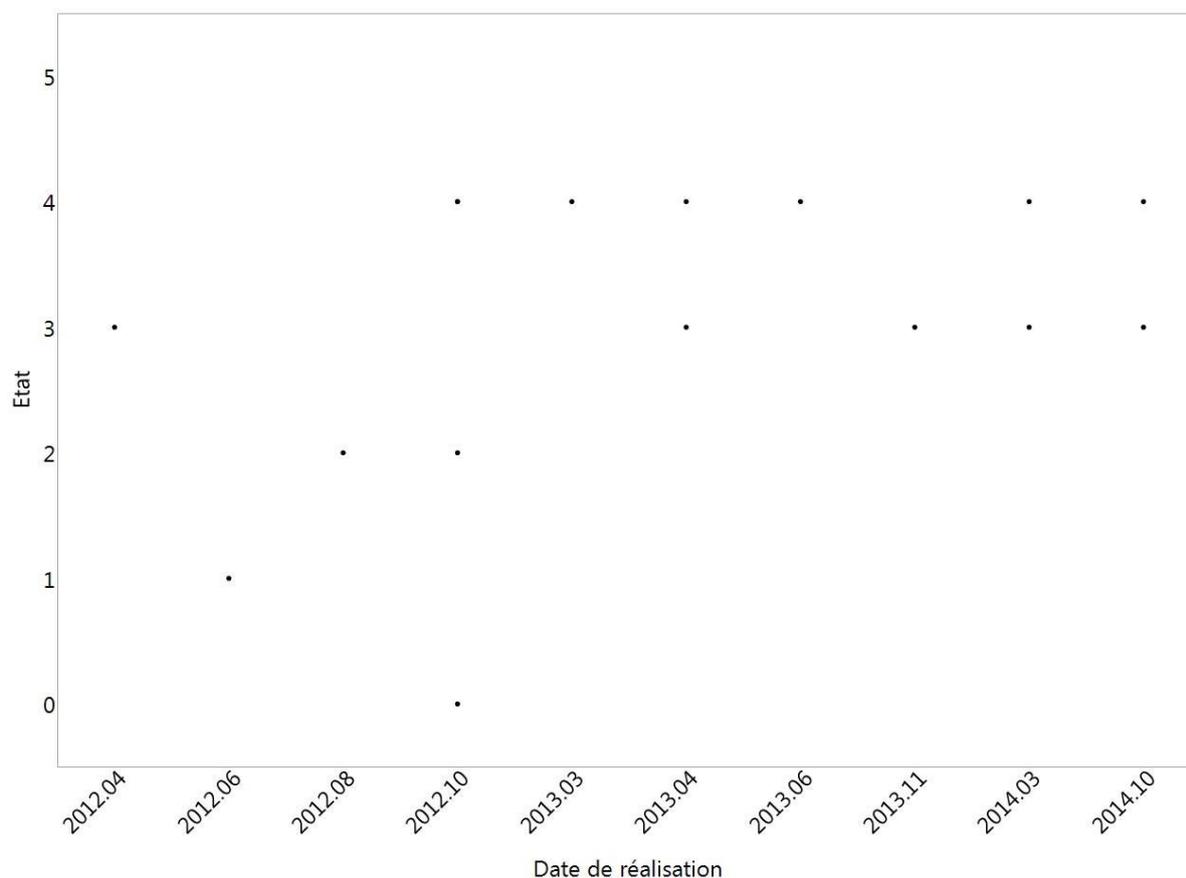


Figure 17 : ÉTAT DES FASCINES D'APRÈS LEUR DATE DE RÉALISATION (ANNÉE.MOIS) SUR UNE ÉCHELLE DE 0 (ÉTAT TRÈS MAUVAIS) À 5 (EXCELLENT ÉTAT).

Différents défauts ont été repérés et catégorisés. Ils sont de 7 types, incluant 'pas de défaut'. Il est à noter qu'une fascine peut présenter plusieurs défauts différents. Les catégories et pourcentages correspondants se retrouvent au Tableau 6. Nous y remarquons que 37 % des fascines ne présentent aucun des défauts répertoriés. Presque autant présentent des problèmes d'affouillements, ce qui en fait donc leur principal défaut. Plus de 20 % d'entre-elles manquent d'entretien. 13 % des fascines wallonnes présentent des problèmes de tassement, ce qui veut dire que les branches utilisées ne sont pas (ou pas suffisamment) tassées. L'efficacité de la fascine risque alors d'être sévèrement amoindrie. Enfin, 6 % des fascines ont des poteaux abîmés ou arrachés, 6 % ont des fagots qui ne sont pas bien jointifs à leurs extrémités (risque de perte d'efficacité) et 3 % sont colmatées, que ce soit par de la boue, par des déchets vert ou encore par des gravillons. Ces observations ont été relayées vers les communes lorsque l'état de la fascine était jugé trop préoccupant. Des conseils ad hoc seront formulés lors de l'installation et du suivi de fascines afin de prévenir et remédier au mieux à ces problèmes. La Figure 18 illustre les problèmes d'affouillements, qui peuvent être léger (à gauche) ou devenir bien plus problématiques avec le temps (à droite). La Figure 19 illustre le besoin d'entretien. Ces fascines nécessitent principalement un ajout de fagots de branchages. Les problèmes de jonctions imparfaites sont illustrés à la Figure 20.

Tableau 6 : POURCENTAGE DE FASCINES PRÉSENTANT CHAQUE DÉFAUT (AFFOUILLEMENTS, PROBLÈME D'ENTRETIEN, POTEAU(X) ABÎMÉ(S), COLMATAGE, TASSEMENT INSUFFISANT DES BRANCHAGES (OU DE LA PAILLE), PROBLÈMES DE JONCTIONS ENTRE LES FAGOTS) OU PAS DE DÉFAUT. La somme des fascines peut dépasser 100 %, certaines fascines pouvant présenter plusieurs défauts.

Affouillements	Entretien	Poteau(x) abîmé(s)	Colmatée	Tassement insuffisant	Jonctions imparfaites	Sans défauts	Nombre de fascines
31 %	22 %	5 %	3 %	13 %	5 %	37 %	91



Figure 18 : ILLUSTRATION DES PROBLÈMES D'AFFOUILLEMENTS



Figure 19 : ILLUSTRATION DU BESOIN D'ENTRETIEN DE CERTAINES FASCINES



Figure 20 : ILLUSTRATION DE PROBLÈMES DE JOINTURE ENTRE LES FAGOTS

✓ **Caractéristiques « culturelles »**

Le Tableau 7 synthétise les caractéristiques culturelles des fascines : 34 % des fascines mortes visitées étaient sur de parcelles sous céréales et 50 % sous cultures sarclées durant l'été 2015. Environ 15 % des fascines de branchages (vivantes ou mortes) sont placées sur des enherbements (prairie, bande enherbée, ou autre) ; 86 % des fascines de paille visitées durant l'été 2015 étaient placées sur des enherbements, faisant office de redent dans des fossés enherbés.

Tableau 7 : POURCENTAGE DE FASCINES IMPLANTÉES SUR CHAQUE CULTURE EN 2015 (DE TYPE SARCLÉ, DE CÉRÉALES, BANDE ENHERBÉE, PRAIRIE OU ENHERBEMENT AUTRE QUE LES DEUX PRÉCÉDENTS – COMME UN FOSSÉ ENHERBÉ) ET CLASSÉ PAR TYPE DE FASCINES.

Type	Fascines mortes					Fascines vivantes		Fascines de paille	
	Sarclée	Céréales	Bande enherbée	Prairie	Enherbement	Bande enherbée	Sarclée	Enherbement	Sarclée
Culture en amont	50 %	34 %	9 %	5 %	1 %	13 %	87 %	86 %	14 %

✓ **Corrélations observées**

Différents liens et corrélations ont pu être établis entre les observations, afin d'en extraire un maximum d'informations. Ainsi, le Tableau 8 révèle les pourcentages de fascines présentant chaque défaut, selon leur position observées. Inversement, le Tableau 9 montre le pourcentage de fascines retrouvées dans chaque position selon les défauts observés.

À la lumière du Tableau 8, il ressort que 76 % des fascines installées au bord d'un fossé ou d'un chemin creux ne présentent pas de défaut, ainsi que 47 % des fascines multiples. En outre, 60 % des fascines de coin de champ et 50 % des fascines de milieu de champ ont des problèmes d'affouillements. De plus, les fascines disposées en redent n'ont que des problèmes d'entretien.

Le Tableau 9, lui, indique que 85 % des fascines ayant des problèmes d'affouillements sont situées en bord de parcelle (Coin de champ + Fossé-chemin creux + Autre) et que les fascines colmatées ou ayant des poteaux abîmés sont toujours situées en bord de parcelle.

Tableau 8 : POURCENTAGE DE FASCINES PRÉSENTANT CHAQUE DÉFAUT, SELON LEUR POSITION OBSERVÉE

		DÉFAUTS						Nombre de fascines	
		Affouillements	Entretien	Poteau(x) abîmé(s)	Colmatée	Tassement insuffisant	Jonctions imparfaites		Sans défauts
POSITIONS	Multiple	18	41	0	0	6	0	47	17
	Simple	34	18	7	4	15	7	35	74
	Milieu	50	17	0	0	33	33	17	6
	Bord – Coin de champ	60	0	0	0	10	10	30	10
	Bord – Enherbement	19	11	4	0	4	7	22	27
	Bord – Fossé-CC	35	41	12	6	24	0	77	17
	Bord – Autre	36	15	6	6	12	0	36	33
	Redent	0	86	0	0	0	0	14	7

Tableau 9 : POURCENTAGE DE FASCINES OBSERVÉES EN CHAQUE POSITION, SELON SES DÉFAUTS

		DÉFAUTS						Sans défauts
		Affouillements	Entretien	Poteau(x) abîmé(s)	Colmatée	Tassement insuffisant	Jonction imparfaites	
POSITIONS	Multiple	11	35	0	0	8	0	24
	Simple	89	65	100	100	92	100	76
	Milieu	11	5	0	0	17	40	3
	Bord – Coin de champ	21	0	0	0	8	20	9
	Bord – Enherbement	18	15	20	0	8	40	18
	Bord – Fossé-CC	21	35	40	33	33	0	38
	Bord – Autre	43	25	40	67	33	0	35
	Redent	0	30	0	0	0	0	3
Nombre de fascines		28	20	5	3	12	5	34

Une analyse en composante principale (ACP) a également été réalisée pour illustrer les corrélations entre défauts et positions. Elle est présentée à la Figure 21. Il apparaît que les fascines de milieu de parcelle semblent corrélées avec les problèmes d'affouillements, de jonctions imparfaites et de tassement insuffisant, et inversement corrélée avec l'absence de défauts. Ceci signifierait que les fascines de milieu de parcelle présentent assez systématiquement l'un ou l'autre défaut, mais ce résultat doit être pris avec prudence car seules 6 fascines de milieu de parcelle ont été répertoriées. Ensuite, les fascines multiples et positionnées en redent semblent corrélées avec le manque d'entretien. Par contre les fascines de bord de parcelle 'Autre' sont inversement bien corrélées avec le manque d'entretien. Ces corrélations sont cependant à relativiser étant donné que la somme des deux axes n'explique que 32 % de la variabilité totale.

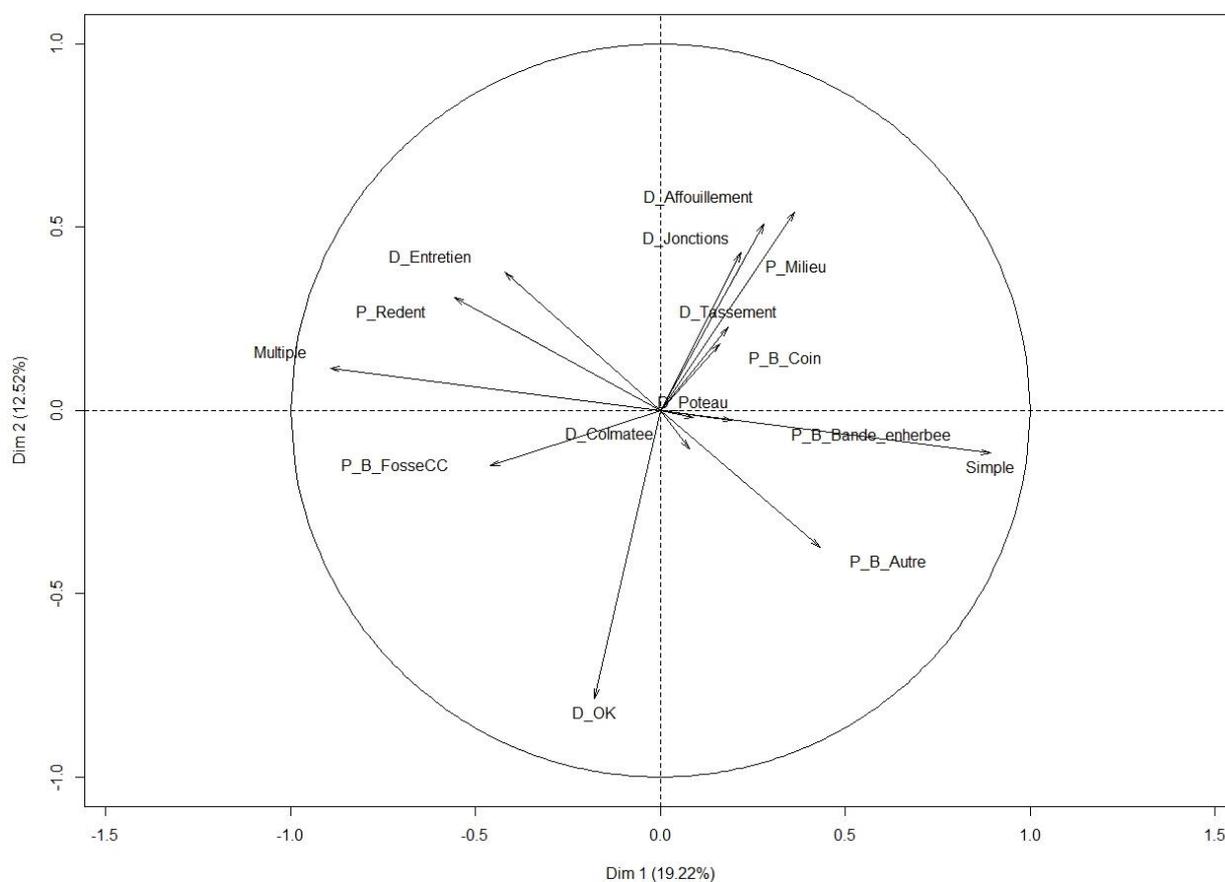


Figure 21 : ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES ENTRE LES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE POSITIONS ET DÉFAUTS OBSERVÉS

✓ **Dépôt de terre en amont des fascines**

Seules six fascines avaient été mises à contribution et ont retenu des sédiments (entre 0,5 et 1,7 T chacune). Au vu du peu d'orages et de la météo particulièrement clémente de l'été 2015, il n'a pas été jugé utile d'effectuer la seconde visite, initialement planifiée en fin d'été. Le Tableau 10 synthétise ces résultats. Il est à noter que pour la fascine située à Court-Saint-Etienne, la visite a suivi un épisode orageux important qui a nécessité des mesures d'urgence immédiates. Par conséquent, la venue des bulldozers ainsi que la météo humide ont empêché la réalisation des mesures de quantité de terre déposée. Il s'agissait sans doute de plusieurs

dizaines de mètres-carré, vraisemblablement récepteurs de plusieurs tonnes de terre (Figure 22).

Tableau 10 : SURFACE DE DÉPÔT ET MASSE DE TERRE RETENUE POUR CHAQUE FASCINE VISITÉE AYANT ÉTÉ SOLlicitÉE PAR UNE COULÉE DE BOUE EN 2015

	Surface de déposition	Masse calculée du dépôt
Ottignies, Centre A. de Marbaix	16 m ²	0,5 T
Rebecq, Chemin Froidmont	18 m ²	1,7 T
Jodoigne, Rue des Beaux Prés	29 m ²	0,7 T
Ecaussinnes, Rue de Familleureux	30 m ²	0,5 T
Orp-Jauche, Rue J. Jadot	16 m ²	0,5 T
Court-St-Etienne, Rue Saussale	Surface inconnue	Masse inconnue



Figure 22 : ÉTAT DU CHAMP APRÈS UNE COULÉE DE BOUE PUIS LE PASSAGE D'UN BULLDOZER EN MESURE D'URGENCE (RUE SAUSSALE, COURT-ST-ÉTIENNE)

Des traces d'érosions du sol ont pu être observées devant 37 % des fascines dont le bassin versant était emblavé en culture de type sarclé, devant 35 % des fascines dont le BV était emblavé en céréales, devant 100 % des fascines sur bande enherbées et devant seulement 25 % des fascines placées sur des prairies. Aucune trace d'érosion n'a été relevée dans les fossés enherbés. En outre, aucune fascine de paille n'était entourée de traces d'érosion, contrairement aux fascines de branchages ; nous avons noté 30 % des fascines mortes et 50 %

des fascines vivantes devant lesquelles des traces d'érosions étaient bien visibles. Tous ces résultats sont disponibles au Tableau 11.

Tableau 11 : POURCENTAGE DE FASCINES DEVANT LESQUELLES DES TRACES D'ÉROSION ONT ÉTÉ RELEVÉES EN ÉTÉ 2015. CLASSIFICATION SELON LE TYPE DE FASCINE D'UNE PART ET SELON LA CULTURE IMPLANTÉE EN AMONT D'AUTRE PART

Trace d'érosion ?	Type de fascines			Culture présente en amont de la fascine				
	Morte	Vivante	Paille	Sarclée	Céréales	Prairie	BE	Enherbement
OUI	30	0	50	37	35	25	0	0
NON	70	100	50	63	65	75	100	100

4.1.5. Conclusions

Les visites de terrain nous donnent une bonne connaissance de l'état des fascines wallonnes et nous ont permis de compléter et actualiser notre base de données. Des recommandations ont en outre pu être adressées aux communes par rapport à l'entretien des fascines disposées sur leur territoire.

La météo fut calme en termes d'orages en 2015 et peu de fascines furent sollicitées par des coulées boueuses. En effet, seules six fascines ont été sollicitées et ont montré un bon fonctionnement. L'objectif initial de deux visites par fascine a été modifié en raison du peu d'événements orageux. Une seconde tournée de visite est planifiée pour l'été 2016 afin d'assurer un bon suivi individuel et d'intégrer toutes les nouvelles fascines installées en 2015 dans notre base de données.

Enfin, ces analyses aideront l'équipe expertise à insister sur les points importants de la mise en place de fascines, en particulier là où il a été observé que le bât blesse. Par exemple à mieux développer le suivi et l'entretien des fascines par les communes et/ou les agriculteurs, selon les cas.

4.2. Le miscanthus (*Miscanthus. Giganteus*), nouvelle piste anti-érosive ?

4.2.1. Résumé

Toujours à la recherche de nouvelles solutions anti-érosives (durables, économiquement viables et performantes dans la rétention de sédiments), il nous a semblé opportun – sous l'impulsion de ValBiom et du CIPF – d'étudier le comportement du miscanthus dans nos région. Des contacts ont été pris avec deux agriculteurs à Ernage et à Burdinne, afin de suivre l'évolution de bandes de miscanthus installées en bas de parcelles sujettes au phénomène d'érosion lors de pluies intenses.

4.2.2. Objectifs poursuivis

Toujours à la recherche de nouvelles solutions anti-érosives (durables, économiquement viables et performantes dans la rétention de sédiments), il nous a semblé opportun – sous l'impulsion de ValBiom et du CIPF – d'étudier le comportement du miscanthus dans nos région. L'AREAS a déjà mené une étude à son sujet qui met en avant son efficacité par rapport aux autres espèces herbacées. ValBiom et le CIPF nous ont chacun proposé un site, sensible à l'érosion par ruissellement concentré, sur lequel le miscanthus a été implanté : l'un à Ernage, avec un miscanthus jeune (< 2 ans) et l'autre à Burdinne, avec un miscanthus plus âgé (8 ans). Le suivi de ces parcelles nous permettra d'étudier le comportement anti-érosif du miscanthus en conditions réelles.

4.2.3. Mesures et suivi

Les deux parcelles ont été visitées en présence de leur propriétaire. Elles bénéficieront d'un suivi régulier qui assurera une caractérisation de la culture de miscanthus en tant que tel (rendement,...), du mulch accumulé au pied de la culture, et de l'éventuel dépôt de sédiment.

4.3. Le simulateur de ruissellement : tests d'efficacité de barrages filtrants

4.3.1. Résumé

La mise en place de fascines est une solution régulièrement proposée par la partie « expertise » de la cellule GISER lors de problèmes d'inondation par ruissellement et de coulées de boue. Afin de tester leur efficacité mais aussi d'élargir la communication autour des solutions proposées par GISER, un site « démonstration » à l'UCL et un simulateur de ruissellement à Gembloux ont été installés.

Le simulateur de ruissellement a maintenant permis de réaliser une première série d'expérimentations. Comme défini dans le protocole de départ, les différentes concentrations en sédiments (30 g.L⁻¹ et 80 g.L⁻¹) et débits (3 L.s⁻¹ et 9 L.s⁻¹) ont été testés, sur deux types de fascines de branchages et deux types de fascines de paille.

Le pourcentage de déposition dans le canal, en amont de la fascine, est influencé par le débit et par le type d'objet testé mais pas par la concentration. Les fascines de paille provoquent plus de dépôt que les fascines de branchages et un débit plus important engendre moins de dépôt. La concentration, elle, combinée au type d'objet ou à la distance à la fascine, n'influence que la répartition spatiale des dépôts en amont du barrage filtrant. Aucune des variables mesurées ici n'a d'impact significatif sur le pourcentage de terre retenue par le dispositif complet. Par contre, l'épaisseur de la lame d'eau devant la fascine et la position du ressaut hydraulique – tous deux étroitement liés – sont influencés par le débit et le type d'objet. Enfin, le coefficient de Manning, utilisé ici de façon détournée comme indicateur du frein à l'écoulement de chaque objet, est dépendant du débit et du type d'objet testé.

Ce dernier semble être un bon indicateur du pourcentage de terre déposée, avec une corrélation entre ce pourcentage et le coefficient de Manning de 0,7.

Pour les expériences futures, le débit est donc un paramètre essentiel à tester. La concentration par contre pourra être discutée. Ensuite, le calcul du coefficient de Manning semble être un outil intéressant, que l'on gagnerait à étudier plus en détails. Enfin, les fascines de pailles ayant montré de bons résultats, il serait probablement utile de creuser le sujet avec une étude sur le plus long terme, incluant des paramètres économiques et temporels.

4.3.2. Objectifs poursuivis

Lorsqu'une commune fait appel à GISER pour des problèmes d'inondation par ruissellement et de coulées boueuses, la cellule « conseil-expertise » de GISER propose régulièrement l'installation de barrages filtrants tels que des fascines. Afin de valider les conseils donnés aux communes lors d'expertises, GISER a décidé de mettre en place un simulateur de ruissellement permettant de mesurer l'efficacité de plusieurs types de barrages filtrants.

Grâce à ce dispositif expérimental, le phénomène d'érosion par ruissellement concentré est reproduit de manière artificielle. De l'eau chargée en sédiments est envoyée via une rampe sur

différents types de barrages filtrants. Les débits et les concentrations, avant et après le barrage filtrant, sont mesurés. La capacité à faire sédimenter en amont grâce à une diminution de la vitesse de l'eau est également évaluée. En fonction des besoins, plusieurs paramètres expérimentaux peuvent être modifiés. L'expérimentation devrait permettre de tirer les enseignements pratiques sur les conditions d'utilisation des différents barrages.

4.3.3. Description du simulateur de ruissellement

Le simulateur de ruissellement, installé avec la collaboration du CRA-W à Gembloux, est composé d'une piscine d'eau claire et d'une cuve chargée en sédiments. Les flux de ces 2 réservoirs sont mélangés pour ensuite être envoyés sur un barrage filtrant via une rampe. Les débits et la charge en sédiments sont mesurés avant et après le barrage. Le plan complet du système ainsi qu'une photographie se trouvent respectivement à la Figure 23 et Figure 24. Chaque élément est détaillé ci-après.

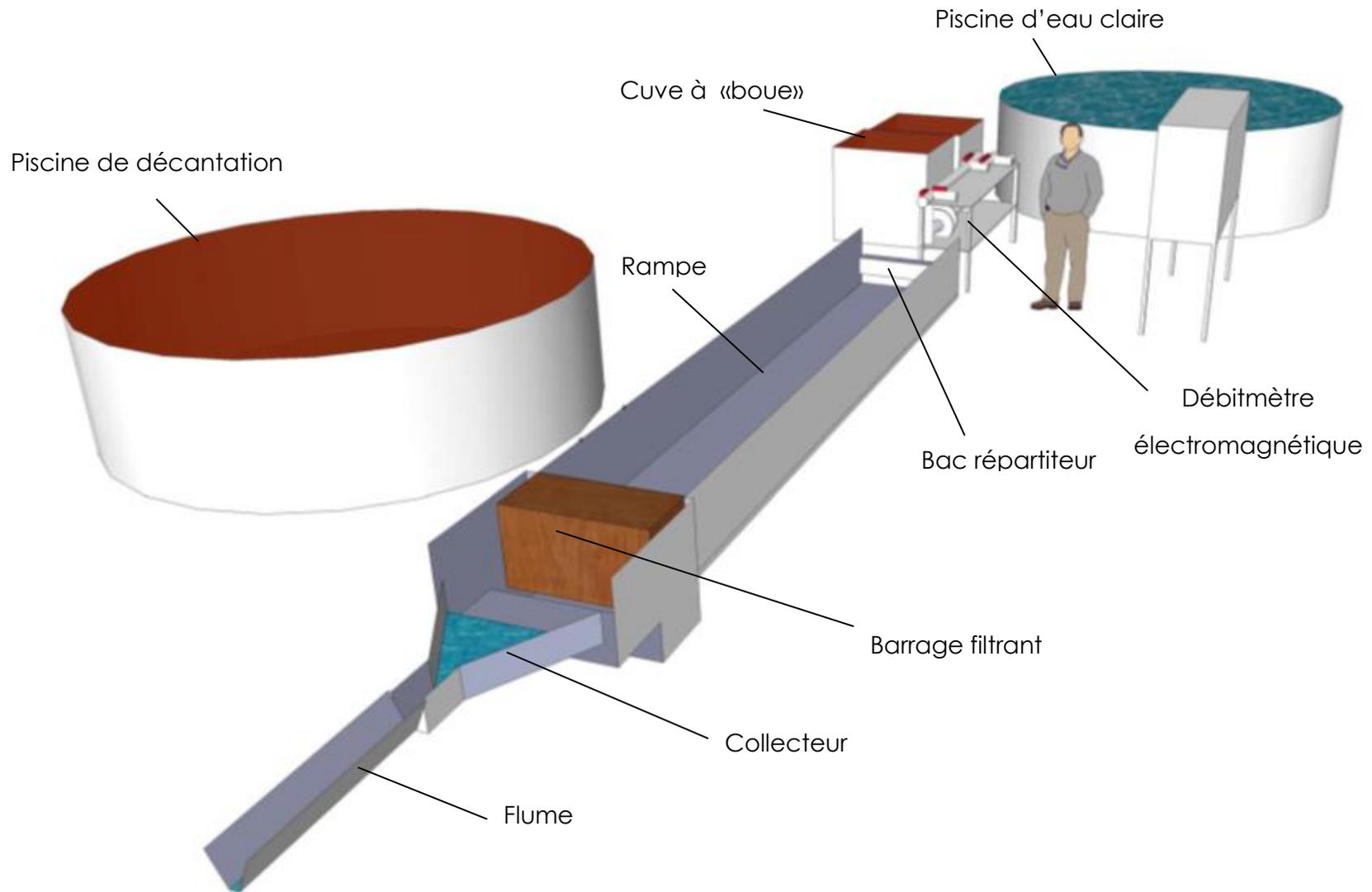


Figure 23 : PLAN DU SIMULATEUR DE RUISSELLEMENT



Figure 24 : PHOTOGRAPHIE DU SIMULATEUR DE RUISSELLEMENT

✓ **Le réservoir d'eau claire et la cuve à boue**

Un réservoir d'eau claire, une piscine de 14 m³ (Figure 25, à gauche), se trouve en amont du simulateur. Une pompe placée dans cette piscine permet d'envoyer de l'eau vers le barrage filtrant. A cet écoulement d'eau claire est ajouté un flux d'eau chargée en sédiments via une cuve connexe de 1 m³ contenant une concentration élevée en sédiments, appelée par la suite « cuve à boue » (Figure 25, à droite). Pour maintenir les sédiments en suspension dans cette cuve, deux pompes tournent en circuit fermé en générant de fortes turbulences. Au moment voulu, à l'aide d'une des deux pompes, la boue est refoulée dans le circuit d'eau claire. L'autre pompe maintient en mouvement les sédiments dans la cuve pour garder la concentration homogène. L'addition des 2 flux permet ainsi d'obtenir la concentration en sédiments voulue. Un système de vannes est placé à la sortie de chaque réservoir afin d'ajuster les débits et les concentrations définis dans le protocole.



Figure 25 : PISCINE D'EAU CLAIRE (À GAUCHE) ET « CUVE À BOUE » (À DROITE)

✓ **Le débitmètre électromagnétique**

Les deux flux provenant de la « cuve à boue » et de la piscine d'eau claire se rejoignent ensuite dans une seule et même conduite. A la suite de celle-ci est placé un débitmètre électromagnétique de marque ABB (Figure 26), prêté par la Direction des Recherches Hydrauliques du SPW.

Le débit est automatiquement enregistré toutes les 15 secondes durant tout le test. En sortant du débitmètre, l'eau chargée en sédiments est amenée au « bac répartiteur ».



Figure 26 : DÉBITMÈTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

✓ Le bac répartiteur

Après le débitmètre électromagnétique, l'eau chargée de sédiments arrive au « bac répartiteur » (Figure 27) qui est placé à l'intérieur de la rampe. Le bac répartiteur, disposé à l'entrée de la rampe, assure une répartition homogène du flux sur toute la largeur de celle-ci par débordement. Au fond de ce bac se trouve un tuyau percé d'une série de trous, dont la surface totale ne dépasse pas 80 % de la surface de la conduite principale. Les trous sont orientés vers le bas du bac. L'eau passant au travers de ce tuyau est ainsi mise sous pression et, en ressortant dans le bac, provoque des remous qui maintiennent les particules en suspension. Par débordement, l'eau s'écoule dans la rampe. Une première prise d'échantillons d'eau chargée est réalisée manuellement à hauteur du bac répartiteur.



Figure 27 : LE BAC RÉPARTITEUR

✓ La rampe

Le simulateur de ruissellement est composé d'une rampe (Figure 28) dont l'inclinaison est ajustable et au travers de laquelle l'eau chargée est envoyée sur un barrage filtrant. La rampe est composée de 6 modules en inox d'1 m de long sur 1 m de large. L'étanchéité entre les modules est assurée par de la toile isolante en aluminium. Des pieds réglables en hauteur sont fixés sur chaque module. Ils permettent de modifier l'inclinaison de la rampe pour atteindre une pente maximale de 10 %. A l'intérieur de la rampe, les hauteurs d'eau et la position du ressaut hydraulique sont mesurées.



Figure 28 : LA RAMPE

✓ Le barrage filtrant

Un barrage filtrant est enchâssé dans une fosse creusée dans le sol en aval de la rampe. L'étanchéité sur la longueur entre le barrage et la rampe est assurée par un joint de bentonite. Les côtés du barrage sont rendus étanches à l'aide de mousse polyuréthane en veillant à garder un mètre utile de barrage pour le test. Le barrage est maintenu contre la rampe en comblant les espaces vides de la fosse par de la terre. Pour éviter que la terre ajoutée ne vienne perturber les mesures, un géotextile recouvrant celle-ci est placé à l'aval du barrage filtrant. Une coupe transversale de l'enchâssement du barrage filtrant est représentée de manière schématique à la Figure 29.

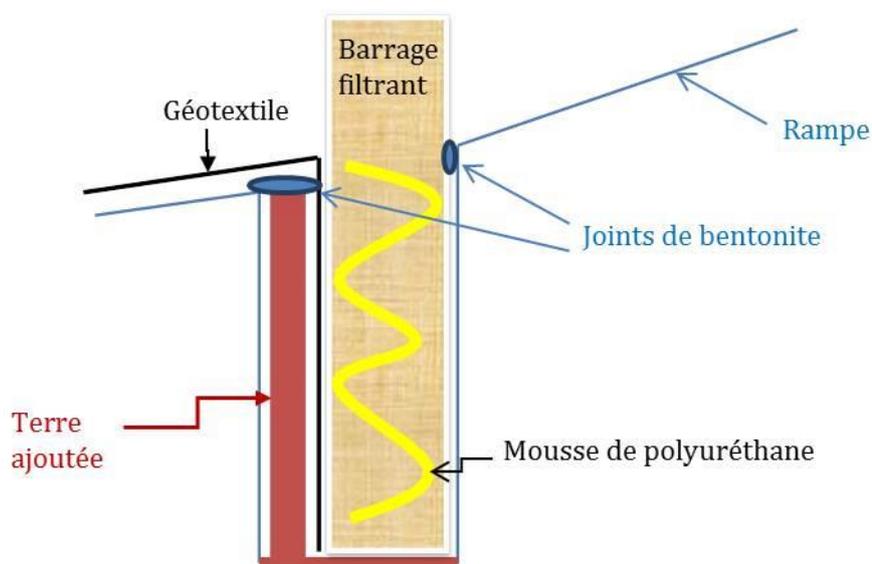


Figure 29 : COUPE TRANSVERSALE SCHÉMATIQUE DE L'ENCHÂSSEMENT DU BARRAGE FILTRANT

✓ Le collecteur



À l'aval du barrage filtrant, un collecteur permet de canaliser l'eau qui le traverse (Figure 30). Une deuxième prise d'échantillons se fait manuellement directement à la sortie du collecteur.

✓ **Le débitmètre « canal jaugeur »**

Après la prise d'échantillons, le débit de sortie est mesuré à l'aide d'un canal jaugeur avec sonde de pression (marque Eijkelkamp ; Figure 30). Ce débitmètre sera nommé « flume » dans la suite du document. Les données de débit sont enregistrées automatiquement toutes les 15 secondes. A la sortie du « flume », une fosse de récupération des eaux a été creusée.

Figure 30 : LE COLLECTEUR ET
LE CANAL JAUGEUR "FLUME"
AVEC SONDE DE PRESSION

✓ **La fosse de récupération des eaux et la piscine de décantation**

L'eau récupérée dans la fosse creusée dans le champ (Figure 31, à gauche) est envoyée via une pompe de relevage vers une autre piscine de 14 m³ qui permet la décantation (Figure 31, à droite). L'eau de la piscine de décantation est réutilisée pour remplir la « cuve à boue ».



Figure 31 : FOSSE DE RÉCUPÉRATION DES EAUX CHARGÉES (À GAUCHE) ET PISCINE DE DÉCANTATION (À DROITE)

4.3.4. Protocole expérimental

✓ **Objectif et paramètres à mesurer**

L'objectif est de mesurer l'efficacité de rétention en sédiments de différents types de

barrages filtrants. La hauteur d'eau et la position du ressaut hydraulique permettront de déterminer l'impact sur le flux suite à la mise en place d'un barrage. La sédimentation provoquée par celui-ci sera évaluée par les relevés de concentration à l'amont et à l'aval du barrage, ainsi que par le relevé et la pesée des dépôts de sédiments dans la rampe, en amont du barrage. La pente sélectionnée est de 5 %.

Quatre combinaisons débits – concentrations (Q-C) sont testées selon l'ordre suivant :

1. Q (3 L.s⁻¹) – C (30 g.L⁻¹)
2. Q (9 L.s⁻¹) – C (30 g.L⁻¹)
3. Q (3 L.s⁻¹) – C (80 g.L⁻¹)
4. Q (9 L.s⁻¹) – C (80 g.L⁻¹)

Pour les fascines de branchages, le barrage est retiré de la fosse entre chaque expérience, nettoyé à l'eau claire et puis replacé devant la rampe. Pour les fascines de paille par contre, la paille est remplacée directement 'in situ'.

La justification du choix des débits et des concentrations ainsi que les mesures réalisées sont détaillés ci-dessous.

I. Débits à tester : 3 L.s⁻¹ et 9 L.s⁻¹

Les débits à tester ont été estimés par la méthode SCS du Curve Number (voir « Fiches Résultats GISER : module SCS-GISER ») pour des bassins versants de 2 ha, 5 ha, 10 ha, 25 ha et 50 ha avec des pentes moyennes de 3 %, 5 % et 10 %. Les visites de terrain permettent maintenant d'affiner ce choix vu qu'il en ressort que l'aire contributive moyenne des fascines wallonnes est de 4 ha et la médiane de 0,06 ha. Pour la pente de 5 % choisie, les débits de pointe estimés par cette méthode atteignent 6 à 26 L.s⁻¹, selon la longueur de la fascine et le temps de retour choisi. Les débits de 3 L.s⁻¹ et 9 L.s⁻¹ qui ont été sélectionnés sont représentatifs pour des périodes de retour de 2 à 10 ans sur des bassins versants de 5 ha.

Le paramètre CN considéré dans le modèle est celui d'un sol nu appartenant au groupe hydrologique B. Le CN « sol nu » représente la situation la plus défavorable en cas d'inondation par ruissellement.

Pour le paramètre « temps de concentration », variable en fonction de la taille du bassin versant, une pluie courte doit être privilégiée vu les événements orageux qu'on souhaite représenter. La situation la plus critique en termes de débit a lieu lorsque la durée de la pluie est égale ou supérieure au temps de concentration. Pour les bassins hydrographiques de la Dyle et de la Mehaigne, il a été mis en évidence que plus de 90 % des bassins versants secs ont un temps de concentration inférieur à une heure. Les données de pluies utilisées (Annexe 1) correspondent donc à des pluies d'une heure, pour des périodes de retour de 6 mois, 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans et 50 ans pour la commune de Gembloux.

Les débits de pointe calculés pour des longueurs de fascine de 15, 25 et 40 m sont exprimés par mètre linéaire de fascine. L'estimation des différents débits de pointe se trouve en Annexe 2 et permet de se faire une première idée de la gamme de débits à tester sur les objets, en fonction de la taille des bassins versants et des périodes de retour.

Afin de valider la mise en œuvre du système expérimental, la gamme des plus faibles débits sera privilégiée dans un premier temps. En effet, pour envoyer des débits importants en régime continu sur les différents barrages filtrants, des quantités d'eau nettement plus importantes seraient nécessaires. Une fois le système expérimental éprouvé, de plus grands débits pourront être testés. Les deux débits retenus pour l'expérimentation sont 3 L.s⁻¹ et 9 L.s⁻¹.

Les débits d'entrée (avant le barrage filtrant) sont mesurés par le débitmètre électromagnétique (Figure 26). Les débits de sortie (après le barrage filtrant) sont déterminés par le canal jaugeur « flume » (Figure 30). Les données sont enregistrées automatiquement toutes les 15 secondes.

Les hauteurs d'eau et la position du ressaut hydraulique sont mesurées manuellement à l'aide d'un mètre, et en présence d'eau claire, en trois ou quatre répétitions pour chaque objet testé.

II. Concentrations en sédiments à tester : 30 g.L⁻¹ et 80 g.L⁻¹

Afin de déterminer les concentrations en sédiments de l'eau chargée à envoyer sur les différents barrages filtrants, les premiers relevés de sédiments du bassin versant de Chastre ont été étudiés.

Les concentrations en sédiments maximales, minimales et moyennes, depuis le début du fonctionnement des échantillonneurs positionnés en deux endroits sur le bassin jusqu'au mois de mars 2016, se trouvent dans le Tableau 12.

Tableau 12 : CONCENTRATIONS EN SÉDIMENTS (MOY, MAX, MIN) DU BASSIN VERSANT DE CHASTRE (MARS 2016)

Concentrations en sédiments (g.L⁻¹)		
	Point 1: Amont	Point 2 : Intermédiaire
Moy.	12,76	4,49
Max.	127,29	56,16
Min.	0,48	0,1

Les données reprises dans le Tableau 12 correspondent à des évènements pluvieux avec des périodes de retour faibles.

Comme discuté dans le rapport final de la convention GISER 2009-2011, les concentrations en sédiments retrouvées dans la littérature pour de l'érosion diffuse en région limoneuse dépassent rarement les 200 g.L⁻¹ (Steegeen et al., 2000) (Figure 32). D'autres mesures de concentrations en sédiments effectuées dans le cadre du projet PROSENSOLS (Maugnard et Biolders, 2009) fournissent des valeurs maximales de 227 g.L⁻¹ en culture de pommes de terre pour une pluie avec une période de retour de 50 ans.

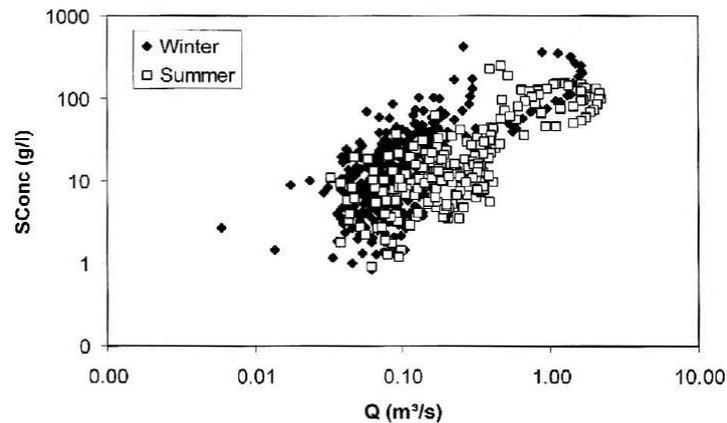


Figure 32 : CONCENTRATIONS EN SÉDIMENTS À L'EXUTOIRE D'UN BASSIN VERSANT DE LA RÉGION LIMONEUSE DURANT L'ÉTÉ ET L'HIVER (STEEGEN ET AL., 2000)

Lors de la détermination de l'efficacité des bandes enherbées, comme expliqué dans le rapport de la convention GISER 2013, des concentrations en sédiments entrantes dans chaque bande enherbée ont été estimées par modélisation. Le Tableau 13 montre la répartition des concentrations maximales en sédiments pour les 11 790 bandes enherbées. Nous remarquons que la majorité des bandes enherbées (87,2 %) reçoit une classe de concentrations en sédiments de 25-50 g.L⁻¹. Peu de bandes enherbées sont concernées par des concentrations supérieures à 50-75 g.L⁻¹.

Tableau 13 : DISTRIBUTION DES BANDES ENHERBÉES DE WALLONIE EN FONCTION DES CONCENTRATIONS EN SÉDIMENTS ENTRANTES (RAPPORT GISER 2013). LES CONCENTRATIONS ONT ÉTÉ ESTIMÉES PAR MODÉLISATION

Classe de concentrations en sédiments (g.L ⁻¹)	% de bandes enherbées
0-25	8.9
25-50	87.2
50-75	2.6
75-100	0.8
100-125	0.3
125-150	0.1
150-175	0.1
175-200	0.0
200-225	0.0
>225	0.0

Au vu de l'ensemble des données disponibles et de nos premières expérimentations, le choix des concentrations s'est porté sur 30 g.L⁻¹ et 80 g.L⁻¹. Les concentrations plus faibles (5 g.L⁻¹) retenues initialement ne permettaient pas d'observer une retenue de sédiment significative dans notre dispositif.

La texture utilisée pour les essais est un limon, texture majoritaire des sols de la zone limoneuse belge. Pour rappel, cette texture est la plus sensible à l'érosion.

III. La terre utilisée pour les tests

Des placettes de terre d'une longueur de 2.5 m sur une largeur d'1.5 m et sur une profondeur de 20-25 cm ont été prélevées sur le site du CRA-W de Gembloux. La terre provenant de chacune de ces placettes est ensuite tamisée pour éviter que de trop grosses pierres n'abîment les pompes ou ne bouchent le système au niveau du répartiteur. La taille du grillage du tamis (environ 5 mm) a été choisie en fonction de la plus petite ouverture du système (trous de 8 mm du tuyau répartiteur). La terre tamisée est stockée dans des bacs, à l'abri de la pluie.

IV. Le traitement des échantillons

La cuve à boue est préparée 24 h avant chaque test. Une quantité déterminée de terre (60 kg et 160 kg respectivement pour obtenir une concentration de 60 g.L⁻¹ et 160 g.L⁻¹) et 1000 L d'eau sont mélangés grâce aux 2 pompes à l'intérieur de la cuve. Au bout de 30 minutes de mise en mouvement des sédiments dans la cuve, un échantillon est prélevé manuellement. De cet échantillon, 200 ml sont mis à l'étuve à 150 °C pendant 16 h pour déterminer la concentration de la « cuve à boue ».

Lors du test de l'efficacité du barrage filtrant, la concentration de la « cuve à boue » est maîtrisée (60 g.L⁻¹ ou 160 g.L⁻¹), le réglage des vannes permet d'obtenir à l'entrée de la rampe un mélange de 50 % d'eau claire et de 50 % du mélange de la « cuve à boue », soit des concentrations de 30 g.L⁻¹ ou de 80 g.L⁻¹ et des débits de 3 L.s⁻¹ ou 9 L.s⁻¹. Pour chaque test, un volume d'eau constant est envoyé sur le barrage filtrant.

Ce volume est calculé par l'équation 3.

$$V = Q * t \quad (3)$$

Avec :

V	[L]	Le volume
Q	[L.s ⁻¹]	Le débit
t	[s]	La durée de l'expérience

Ainsi, pour travailler à volume constant – vu que l'élément limitant est le volume de boue (en suspension dans la cuve à boue) disponible – le temps de chaque test était adapté au débit. Les tests à 3 L.s⁻¹ duraient 9 minutes (540 s) tandis que ceux à 9 L.s⁻¹ étaient arrêtés après 3 minutes (180 s).

Trois échantillons sont prélevés à hauteur du répartiteur et derrière le collecteur de façon régulière. Le minutage des prélèvements dépend du débit ; prélèvements à 1 minute, 4 minutes et 7 minutes pour un débit de 3 L.s⁻¹ et à 30 s, 90 s et 150 s pour un débit de 9 L.s⁻¹. Les trois échantillons sont traités comme pour la détermination de la concentration de la « cuve à boue ».

Un cône de sédimentation se forme à l'amont du barrage filtrant (Figure 33, à gauche). L'épaisseur du cône est déterminée à l'aide d'un pied à coulisse de façon systématique selon

un maillage de 5 cm (à proximité du barrage filtrant) puis de 15 cm pour le reste du cône. La granulométrie du dépôt en amont et en aval (Figure 33, à droite) selon un maillage défini va être réalisée pour les fascines de branchage (résultats non encore disponibles).

Pour le calcul de la masse de terre déposée, le dépôt en amont est totalement prélevé, séché et pesé.



Figure 33 : CÔNE DE SÉDIMENTATION EN AMONT DE LA FASCINE (À GAUCHE) ET DÉPÔT EN AVAL DE LA FASCINE (À DROITE)

Le pourcentage de terre capturée est ensuite calculé de deux manières. D'une part la masse de terre sèche récupérée dans le canal est comparée à la masse de terre sèche injectée dans le canal – ce résultat est le pourcentage de terre déposée. D'autre part, la masse de terre sèche récupérée à la sortie est comparée à la masse de terre sèche injectée (par comparaison des échantillons prélevés à l'entrée et la sortie) – ce résultat est le pourcentage de terre retenue, piégées.

✓ Barrages filtrants

I. Les types de barrage filtrant testés

Les objets suivants ont été testés avec pour priorité la numérotation indiquée ci-dessous :

1. Fascine morte, type « entrepreneur » (Fa-E)
2. Fascine morte, type « GISER » (Fa-GISER)
3. Filtre à paille (52 kg.m^{-1/3}) (FP52)
4. Filtre à paille (76 kg.m^{-1/3}) (FP76)

La fascine morte « entrepreneur » est réalisée à partir de fagots fournis par un entrepreneur qui a l'habitude d'installer des fascines. La fascine morte « GISER » correspond à une fascine « idéale » réalisée par les soins de l'équipe GISER, c'est-à-dire une fascine dont les fagots sont constitués de branches dont le diamètre respecte la gamme recommandée par l'AREAS : 1 à 3 cm.

Trois répétitions par objet ont été effectuées. Deux méthodes furent mises en œuvre. La première concerne les filtres à paille : le cadre était maintenu en place mais la paille était renouvelée systématiquement entre chaque expérience. Le volume disponible dans le cadre étant connu, la compaction souhaitée était atteinte en plaçant une masse précise de paille dans le volume disponible. La seconde méthode, appliquée aux fascines de branchage, a vu la réalisation de trois fascines de chaque types (3 fascines 'entrepreneur et 3 fascines 'GISER') pour les trois répétitions. Chaque fascine était mise en place, testée selon une combinaison 'débit-concentration', puis lavée convenablement. Et ce, quatre fois de suite pour les quatre combinaisons 'débit-concentration' choisies. Ainsi, chaque fascine de branchage a été utilisée quatre fois de suite tandis que les filtres à paille ont été systématiquement remplacés entre deux tests.

II. Caractérisation physique de chaque barrage filtrant

Les caractéristiques mesurées pour chaque barrage filtrant sont reprises ci-dessous :

1. Fascine morte « entrepreneur » - « GISER » :

- le nombre de branches / m² et le diamètre moyen des branches qui sont déterminés par imagerie sur deux coupes transversales prises de part et d'autre de la fascine ;
- la porosité totale de la fascine : obtenue d'après la surface occupée par les branches sur chaque face latérale de la fascine (analyse de la photographie de cette zone).

2. Filtre à paille (type DAFoR)

- la masse totale de la paille dans le filtre et le volume disponible pour la paille, ce qui a permis de déterminer la densité de la paille dans le filtre.

III. Imagerie de la coupe transversale

La fascine type « entrepreneur » a été construite à l'aide de fagots de saule fournis par l'entrepreneur qui a installé les fascines sur le site de démonstration de l'UCL (Voir « Fiches Résultats GISER : l'aménagement du site de démonstration au Centre A. de Marbaix »).

Les fagots sont coupés à l'aide d'une tronçonneuse et sont ensuite insérés dans une structure métallique. Un poids de 80 kg est posé au-dessus des fagots avant de sangler la fascine. Une fois sanglée, la fascine et sa structure métallique sont enchâssées devant la rampe.

Afin d'évaluer la proportion de vide, des photographies de la coupe de la fascine ont été traitées par imagerie à l'aide d'un script mis au point dans Matlab. La Figure 34 montre à gauche une sélection d'une portion de la photographie de la coupe de la fascine et à droite la détection des centres des branches ainsi que leur périmètre.

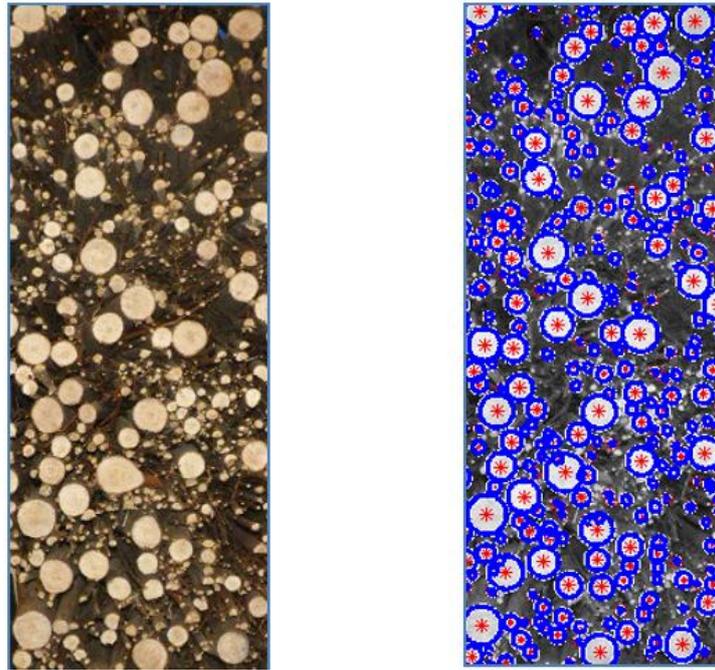


Figure 34 : PHOTOGRAPHIE D'UNE COUPE D'UNE FASCINE (À GAUCHE) ET DE LA DÉTECTION DES CENTRES DES BRANCHES ET DE LEUR PÉRIMÈTRE (À DROITE)

La Figure 35 représente la proportion cumulée des branches en fonction de leur diamètre. Nous pouvons observer que, de manière globale, 75 % des branches ont un diamètre inférieur 1,5 cm et que 50 % de la fascine est composée de branches dont le diamètre est inférieur à 1 cm. Selon Ouvry et al. (2012), la fascine doit être composée de branches de 1 à 3 cm de diamètre. Nous remarquons que cette fascine – servant ici d'exemple – ne correspond pas à cette recommandation de fabrication car plus de 50 % des branches ont un diamètre inférieur à 1 cm. Le seuil de détection des branches est de 0,4 cm. En outre, aucune branche ne présente un diamètre supérieur à 4 cm dans l'exemple proposé ici.

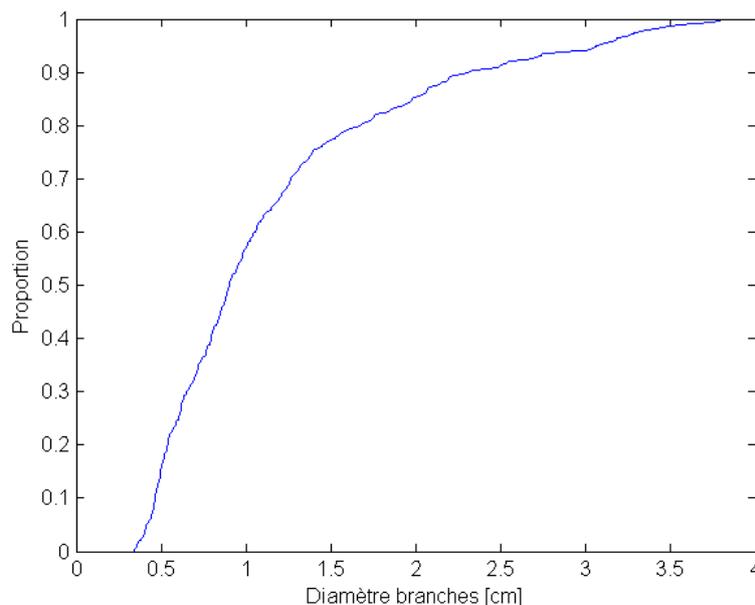


Figure 35 : FONCTION DE RÉPARTITION DU DIAMÈTRE DES BRANCHES

IV. Coefficient de Manning

Pour caractériser les objets et avoir un outil de comparaison, notamment avec l'AREAS, il a été choisi de travailler avec le coefficient de Manning. La formule originale (Équation 4) a été déclinée sous sa forme impliquant le débit (Équation 5) et remaniée pour isoler n, le coefficient de Manning recherché (Équation 6).

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (4)$$

$$Q = VA = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

$$n = \frac{1}{Q} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (6)$$

Avec :

V	[m.s ⁻¹]	La vitesse du flux
R	[m]	Le rayon hydraulique ; R = A/P
A	[m ²]	L'aire mouillée, c'est-à-dire la surface par laquelle passe l'écoulement, A = L * h [m ²]
L	[m]	La largeur du canal
h	[m]	L'épaisseur de la lame d'eau
P	[m]	Le périmètre mouillé, c'est-à-dire la longueur de l'interface liquide-paroi du canal, en coupe, P = L + 2 h
S	[m.m ⁻¹]	La pente du fond du canal
Q	[m ³ .s ⁻¹]	Le débit
n	[s.m ^{-1/3}]	Le coefficient de Manning

L'utilisation faite ici du coefficient de Manning est détournée, principalement car une condition de son utilisation (écoulement uniforme) n'est pas respectée. Par conséquent, les valeurs obtenues ne pourront être comparées à des travaux concernant les bandes enherbées ou autres types de rugosités habituellement caractérisées par ce coefficient. C'est donc avec circonspection que des conclusions seront tirées des résultats. Il semblait néanmoins utile de calculer ce coefficient afin de pouvoir situer ces travaux par rapport à ceux de l'AREAS et afin d'avoir un indicateur unique pour comparer tous nos objets. Il a été jugé acceptable de garder le coefficient de Manning pour cette utilisation à condition de le calculer dans les mêmes conditions pour chaque objet. Il s'agit essentiellement de veiller à mesurer h la hauteur d'eau, au même endroit dans le canal, lors de chaque mesure. Il a été décidé de prendre cette mesure juste en amont de la fascine.

4.3.5. Résultats

Les premières expériences ont été menées d'août à novembre. Quatre barrages filtrants ont été testés : deux types de fascines (« entrepreneur » et « GISER ») ainsi que deux type de filtre à paille ($52 \text{ kg.m}^{-1/3}$ et $76 \text{ kg.m}^{-1/3}$).

Les résultats obtenus seront présentés selon les facteurs influençant chaque variable observée, d'après les ANOVAS correspondantes. Ainsi, après avoir examiné la porosité des fascines de branchages et les diamètres des branches utilisées, la quantité de terre déposée et la quantité de terre retenue seront évoquées. Ensuite l'attention se portera vers l'épaisseur de la lame d'eau et la position du ressaut, avant de discuter du coefficient de Manning. Enfin, pour terminer, la répartition spatiale des sédiments dans le canal sera examinée et des corrélations intéressantes seront exposées.

✓ Porosité

Les fascines 'entrepreneur' ont une porosité moyenne de 0,70 tandis que les fascines 'GISER' ont une porosité moyenne légèrement plus faible, de 0,67. Les deux types de fascines ne sont pas statistiquement différentes l'une de l'autre (Figure 36). La porosité des fascines de paille n'a pas été calculée car aucune méthode fiable n'a pu être trouvée pour le faire.

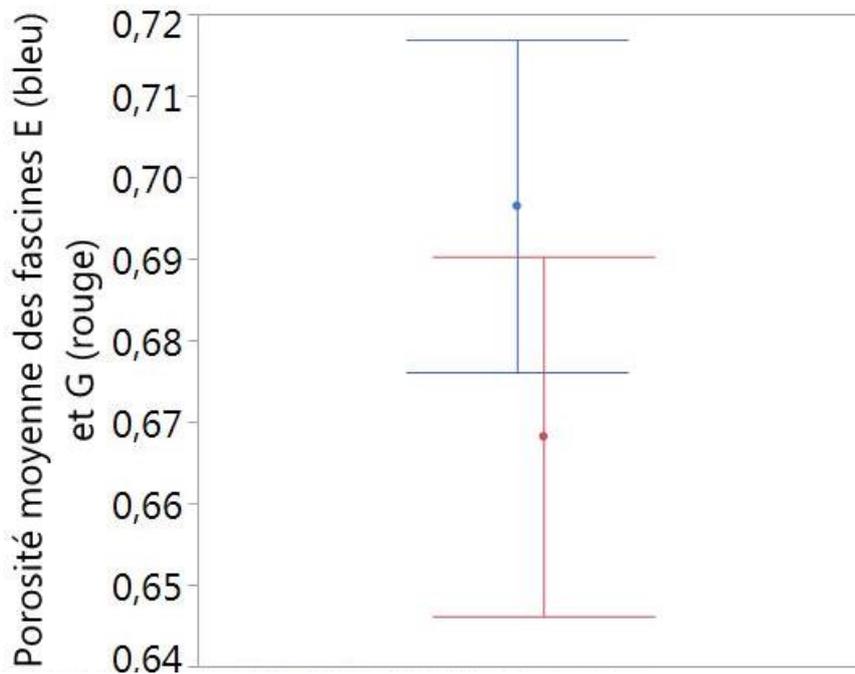


Figure 36 : POROSITÉ MOYENNE DES FASCINES 'ENTREPRENEUR' ET 'GISER', AVEC LES ÉCART-TYPE

✓ Diamètre des branches utilisées

La Figure 37 permet de distinguer clairement les deux types de fascines (E et G) d'après la fonction de répartition du diamètre des branches utilisées pour chaque fascine. En effet, nous remarquons que les fascines 'GISER' (cyan, vert et bleu) ne comportent pas de branches dont le diamètre est inférieur à 1 cm, ni de branches dont le diamètre est supérieur à 3-3,5 cm.

Les diamètres des branches des fascines 'entrepreneur' (rouge, magenta et jaune) couvrent une plus grande gamme de valeurs, allant de 0,4 cm (seuil inférieur de détection des branches par le programme) à 4-4,5 cm. Ces résultats correspondent bien à l'objectif recherché lors de la confection des fascines.

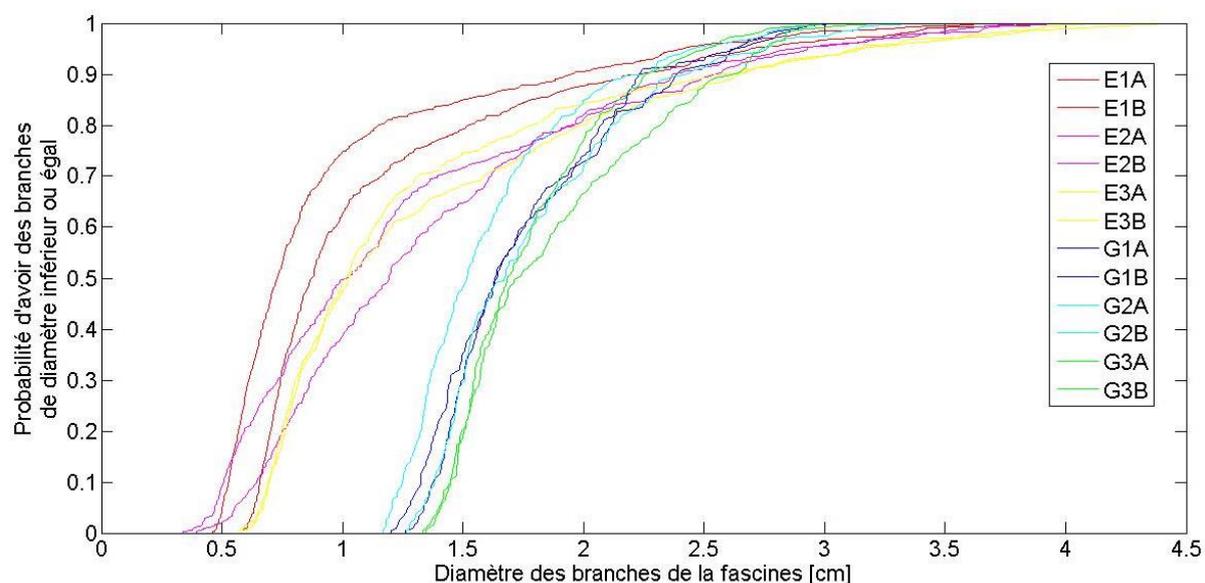


Figure 37 : FONCTION DE DISTRIBUTION DU DIAMÈTRE DES BRANCHES DE CHAQUE TYPE DE FASCINE (VUE DE CHAQUE CÔTÉ - A ET B)

✓ Influence des facteurs mesurés sur la terre déposée et retenue

I. Terre déposée

Un première ANOVA, dont les résultats sont repris au Tableau 14, indique que la quantité de terre déposée devant les fascines est influencée par le débit, l'objet testé et par l'interaction entre ces deux paramètres. Par contre la concentration n'a pas d'effet significatif sur la quantité de terre déposée dans le canal devant la fascine.

Tableau 14 : RÉSULTAT DE L'ANOVA SUR LES FACTEURS EXPLICATIFS DU POURCENTAGE DE TERRE DÉPOSÉE DANS LE CANAL EN AMONT DE LA FASCINE

	chisq	Df	Pr(>Chisq)
Concentration	0.7684	1	0.380699
Débit	31.0589	1	2.503e-08 *** 1
Objet	76.7794	7	6.237e-14 ***
Débit : objet	20.5343	7	0.004524 **

La variable 'Objet' a un impact significatif sur la quantité de terre retenue (Figure 38). Les filtres à pailles présentent un pourcentage de terre retenue plus élevé que les fascines de branchages, et parmi ceux-ci le filtre le plus compact est le plus performant. Il est à noter que la compaction ne doit pas être poussée à l'extrême pour autant. En effet, l'effet filtre

¹ Code significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

recherché serait alors perdu et il s'agirait alors simplement d'un barrage. La fascine 'entrepreneur' est plus efficace que la fascine 'GISER'.

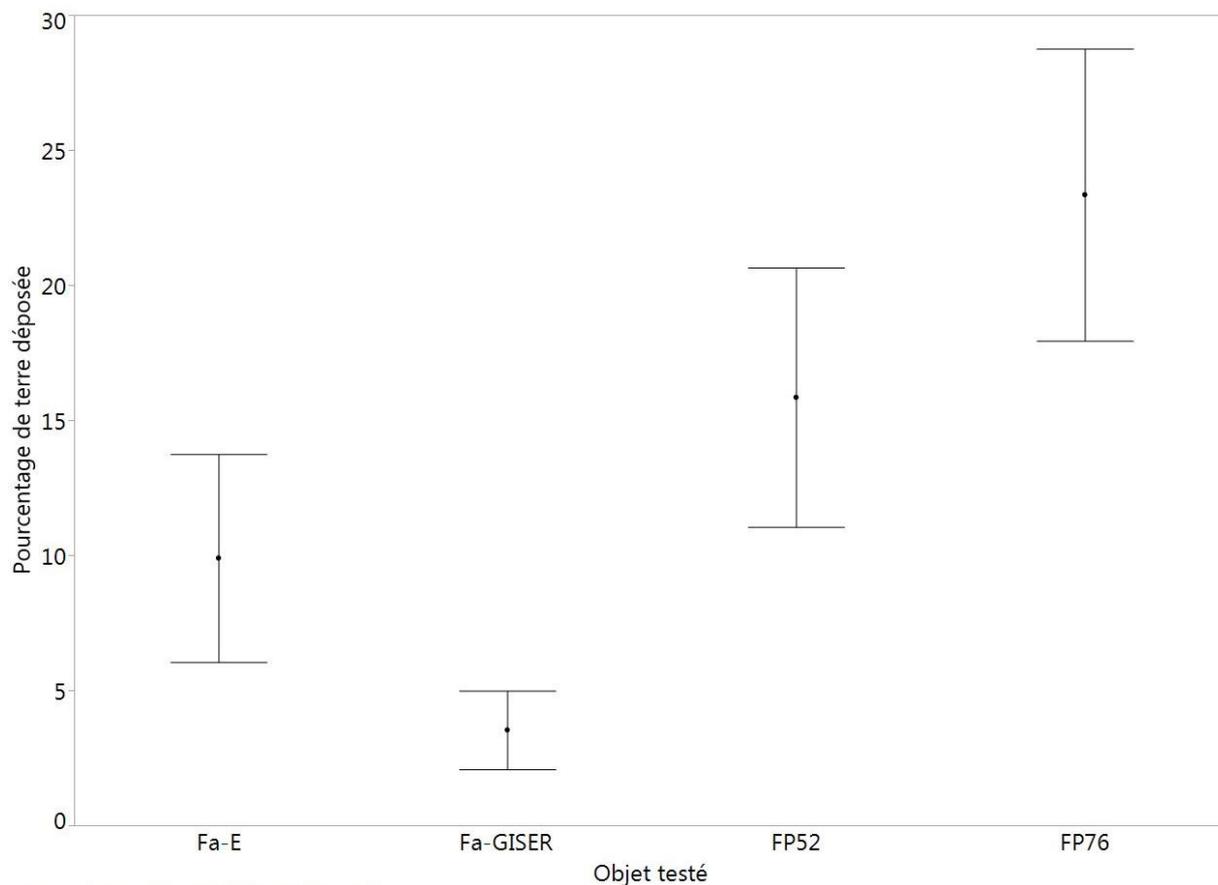


Figure 38 : MOYENNE ET ÉCART-TYPE DU POURCENTAGE DE TERRE RETENU, PAR OBJET TESTÉ, TOUS DÉBIT ET CONCENTRATION CONFONDUS

Il est attendu que le pourcentage de déposition soit inversement proportionnel au débit. En effet, une plus grande vitesse de l'eau est défavorable à la déposition des particules en suspensions. C'est effectivement ce que reflètent les tests statistiques avec une p-valeur inférieure à 0.001 pour le débit. Celui-ci joue donc un rôle significatif, au même titre que le type d'objet testé. En outre, les écart-type présenté à la Figure 39 révèlent une plus grande variabilité à 3 L.s⁻¹ qu'à 9 L.s⁻¹.

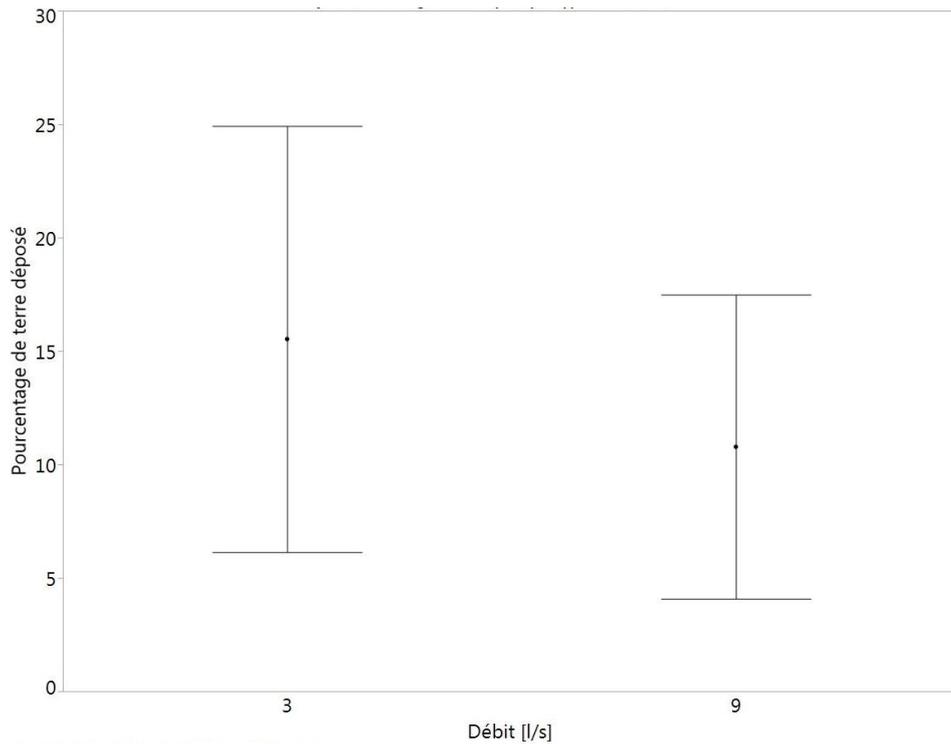


Figure 39 : MOYENNE ET ÉCART-TYPE DU POURCENTAGE DE TERRE DÉPOSÉE, SELON LE DÉBIT, TOUS OBJETS ET CONCENTRATION CONFONDUS

Enfin, l'interaction objet – débit a été relevée comme significative dans la détermination du pourcentage de terre déposée. La Figure 40 illustre cette interaction et montre que pour tous les objets – sauf la fascine 'GISER' – le pourcentage de terre déposée diminue quand le débit augmente.

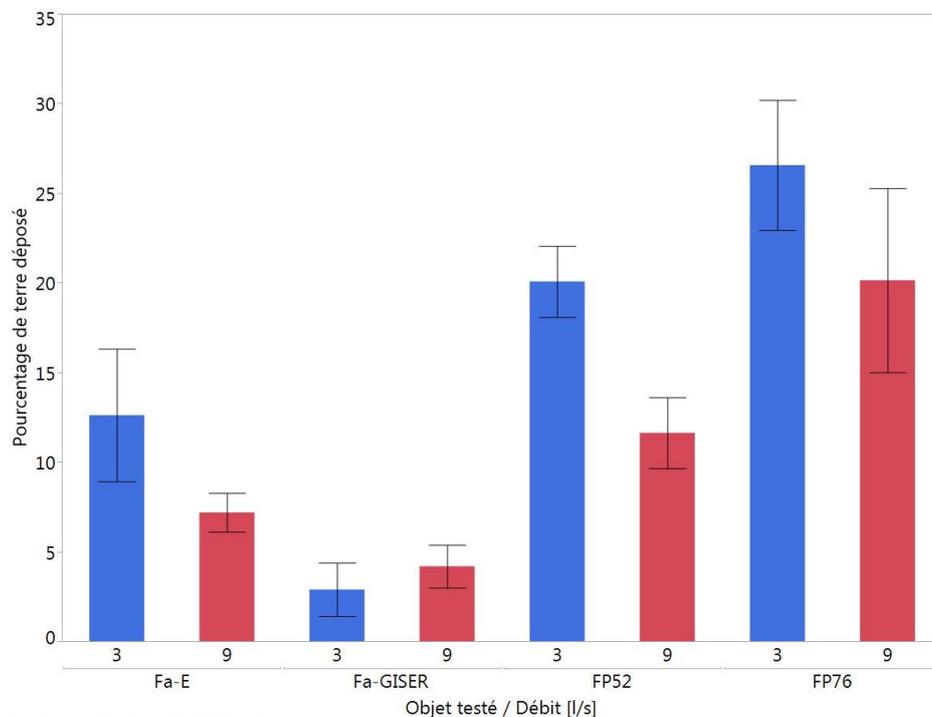


Figure 40 : POURCENTAGE DE TERRE DÉPOSÉE SELON L'OBJET TESTÉ ET LE DÉBIT, TOUTES CONCENTRATIONS CONFONDUES

II. Terre retenue

L'ANOVA réalisée ici révèle qu'aucun des facteurs testés n'a un effet significatif sur le pourcentage de terre retenue, au seuil de significativité de 0.05 (Tableau 15).

Tableau 15 : RÉSULTAT DE L'ANOVA SUR LES FACTEURS EXPLICATIFS DU POURCENTAGE DE TERRE RETENU PAR LE DISPOSITIF EXPÉRIEMENTAL

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)
Concentration	0.8043	1	0.36981
Débit	3.3056	1	0.06904 ²
Objet	1.8957	3	0.59433
Concentration : Débit	0.0632	1	0.80151
Concentration : Objet	1.5111	3	0.67971
Débit : objet	5.7998	3	0.12177

Pour le débit, nous sommes cependant proches de l'effet significatif. La Figure 41 présente cet effet, par type d'objet afin d'obtenir un meilleur outil de comparaison entre le pourcentage de terre déposée (Figure 40) et retenue (Figure 41). Les résultats sur fascine de paille sont nettement plus variables que pour les fascines de branchages. Globalement, l'effet du débit sur le pourcentage de terre retenue semble minime. Pour le filtre de paille FP76 l'augmentation de débit semble mener à une baisse sensible de la rétention en sédiments mais même ici, l'effet n'est pas suffisant pour être significatif.

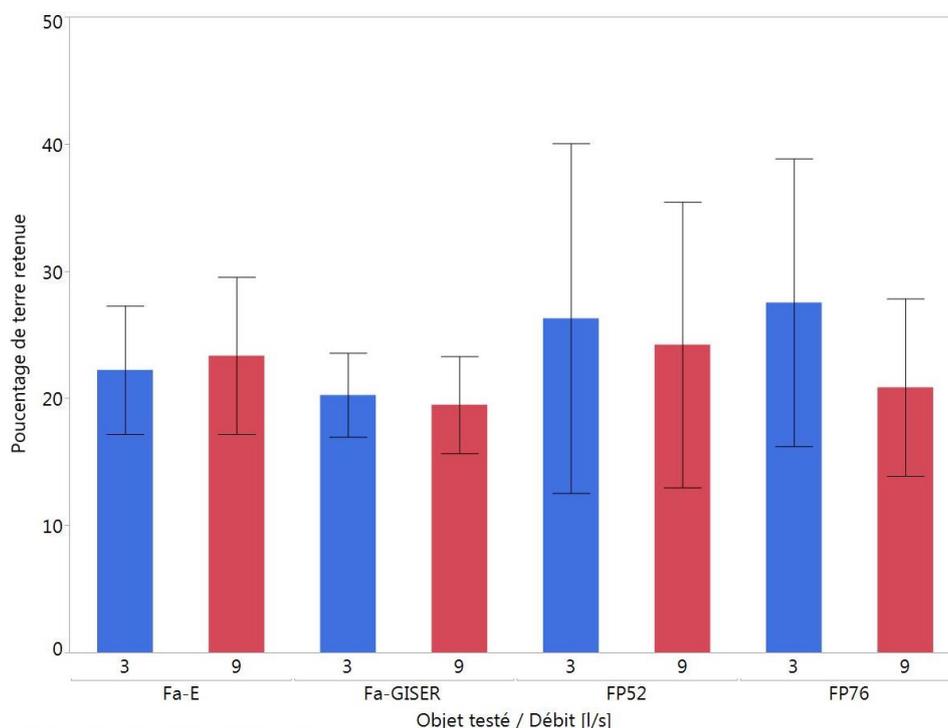


Figure 41 : POURCENTAGE DE TERRE RETENU PAR LA DISPOSITIF EN FONCTION DU DÉBIT ET DE L'OBJET TESTÉ, TOUTES CONCENTRATIONS CONFONDUES

III. Comparaison des quantités de terre déposées et retenues

² Code significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

La Figure 42 et la Figure 43 présentent respectivement le pourcentage et la masse de sédiments, retenue et déposée, afin de comparer la déposition et la rétention globale des sédiments. Pour ces deux graphes, l'entièreté de chaque barre (bleu + rouge) représente la terre retenue, tandis que la partie rouge représente la terre déposée dans le canal.

Les fascines de branchages semblent piéger plus de sédiments que les fascines de paille. Les fascines de paille, elles, provoquent plus de dépôts dans le canal, comme évoqué précédemment.

On peut par contre remarquer quelques anomalies. En effet, pour les expériences 6, 14, 19, 20, 22 et 24, la masse (et le pourcentage) de terre déposée dans le canal est plus grande que la différence entre les masses de terre entrées et sorties du canal. Ce qui reviendrait à dire que pour ces expériences, la fascine a été productrice de sédiment... Pour tenter d'expliquer ce phénomène, un calcul de propagation d'erreur a été effectué, dans le but de vérifier si les anomalies observées dépassent ou non l'erreur due aux mesures. Ces résultats sont basés sur des mesures de débit, de masse et de volume.

Le bilan de masse est calculé via l'équation 7.

$$\Delta M = M_{out} - M_{in} = \int_0^t FM_{out} dt - \int_0^t FM_{in} dt \quad (7)$$

Avec :

ΔM	[kg]	Le bilan de masse
M_{in} et M_{out}	[kg]	Les masses injectées à l'amont et récupérées à l'aval, respectivement
FM	[kg.s ⁻¹]	Le flux de masse, calculé selon l'équation 8.

$$FM = Q \cdot C \quad (8)$$

Avec :

Q	[L.s ⁻¹]	Le débit mesuré par le débitmètre électromagnétique à l'entrée du canal
C	[kg.L ⁻¹]	La concentration mesurée par échantillon à l'amont et à l'aval du canal ; $C = M/V$ où V est le volume de l'échantillon prélevé [L] et M est la masse sèche de l'échantillon [kg].

Ainsi, l'incertitude sur le flux de masse (FM) est donnée par l'équation 9.

$$\delta FM = \frac{\partial FM}{\partial Q} \cdot \delta Q + \frac{\partial FM}{\partial M} \cdot \delta M + \frac{\partial FM}{\partial V} \cdot \delta V \quad (9)$$

Avec les mêmes variables FM (flux de masse [kg.s⁻¹]), Q (débit [L.s⁻¹]), M (masse de l'échantillon [kg]) et V (volume de l'échantillon [L]).

Le symbole δ dénote l'incertitude. Les erreurs de mesure sur le débit, la masse et le volume sont respectivement de 0,1 L.s⁻¹, 0,005 kg et 0,005 L, ce qui correspond à la précision des instruments de mesure utilisés (débitmètre et balance) ou à la précision de lecture possible sur l'échelle graduée de la burette utilisée pour la mesure du volume.

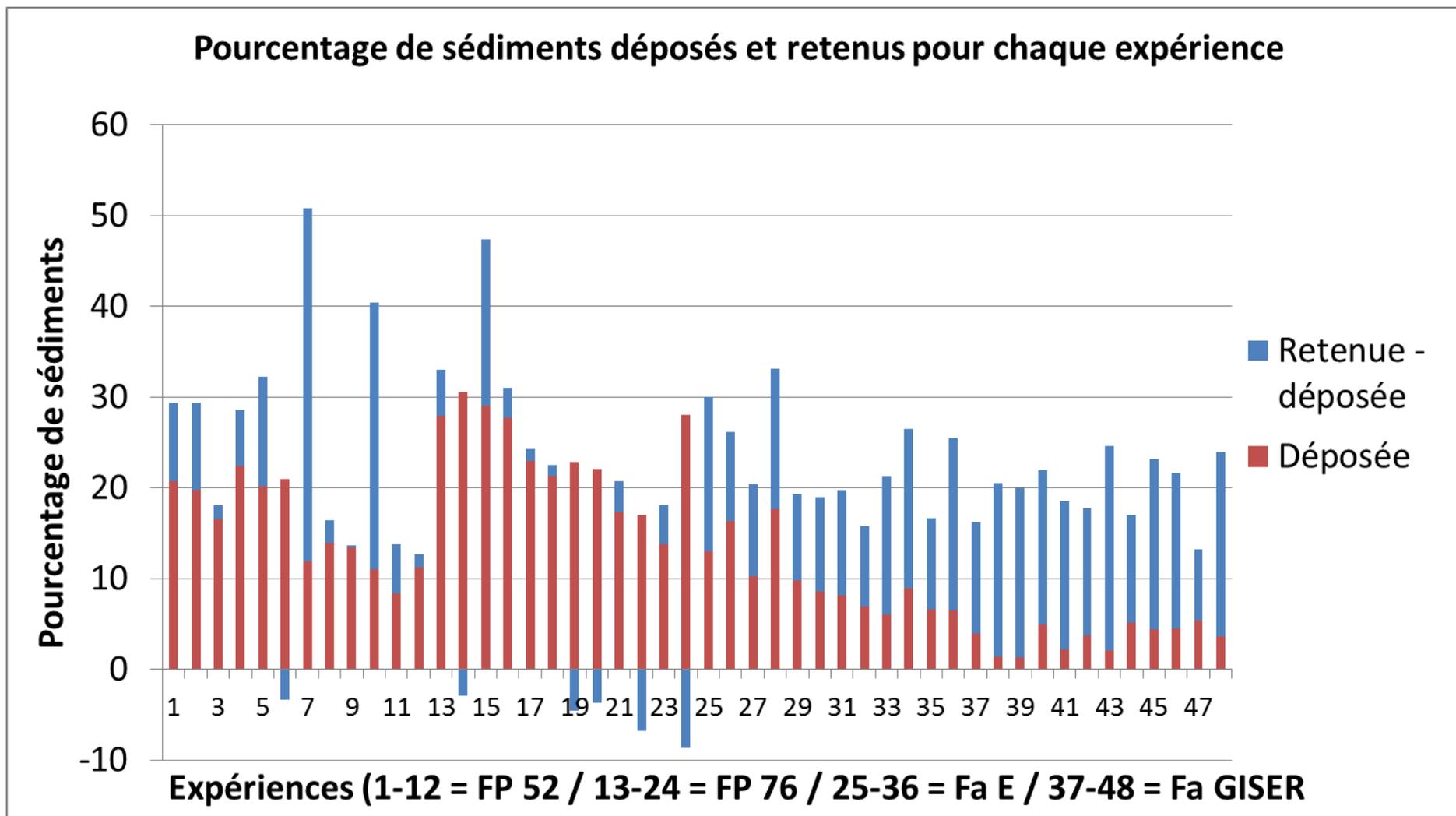


Figure 42 : POURCENTAGE DE SÉDIMENTS DÉPOSÉS DANS LE CANAL ET RETENUS DANS LE DISPOSITIF, POUR CHAQUE EXPÉRIENCE

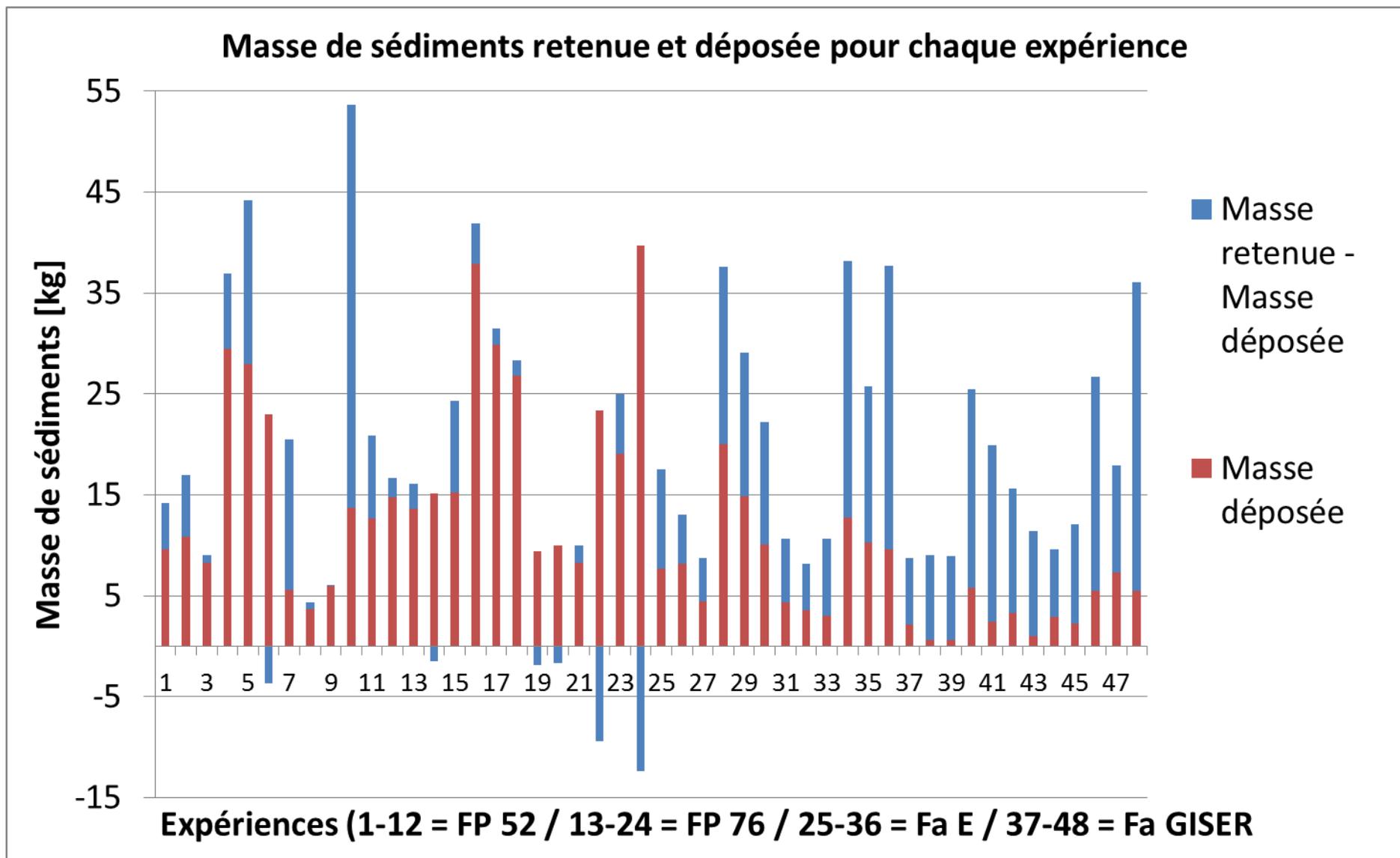


Figure 43 : MASSE DE SÉDIMENTS RETENUE ET DÉPOSÉE POUR CHAQUE EXPÉRIENCE

L'erreur sur le bilan de masse dépend donc bien des erreurs sur le débit, la masse et le volume. Le résultat de ce calcul donne des erreurs de l'ordre de 11,5 à 23 kg selon les expériences, pour le bilan de masse. Or les « anomalies » relevées sur les graphiques ne dépassent pas 12 kg dans les négatifs. Aussi, il semble raisonnable de dire que ces valeurs négatives sont dues aux petites erreurs de mesures inhérentes aux expériences en conditions réelles et ne sont pas significatives, ni problématiques.

✓ **Influence des facteurs mesurés sur l'épaisseur de la lame d'eau devant la fascine**

L'ANOVA – résumée au Tableau 16 – montre une influence significative du débit, de l'objet testé et de leur interaction. La concentration n'est pas reprise car les mesures d'épaisseur de lame d'eau et de position du ressaut (cf. section suivante) ont été réalisées lors des tests à l'eau claire en vue de calculer le coefficient de Manning.

Tableau 16 : RÉSULTAT DE L'ANOVA SUR LES FACTEURS EXPLICATIFS DE L'ÉPAISSEUR DE LA LAME D'EAU DEVANT LA FASCINE

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)
Débit	488.2720	1	< 2.2e-16 *** ³
Objet	94.7884	3	< 2.2e-16 ***
Débit : objet	12.1205	3	0.008651 **

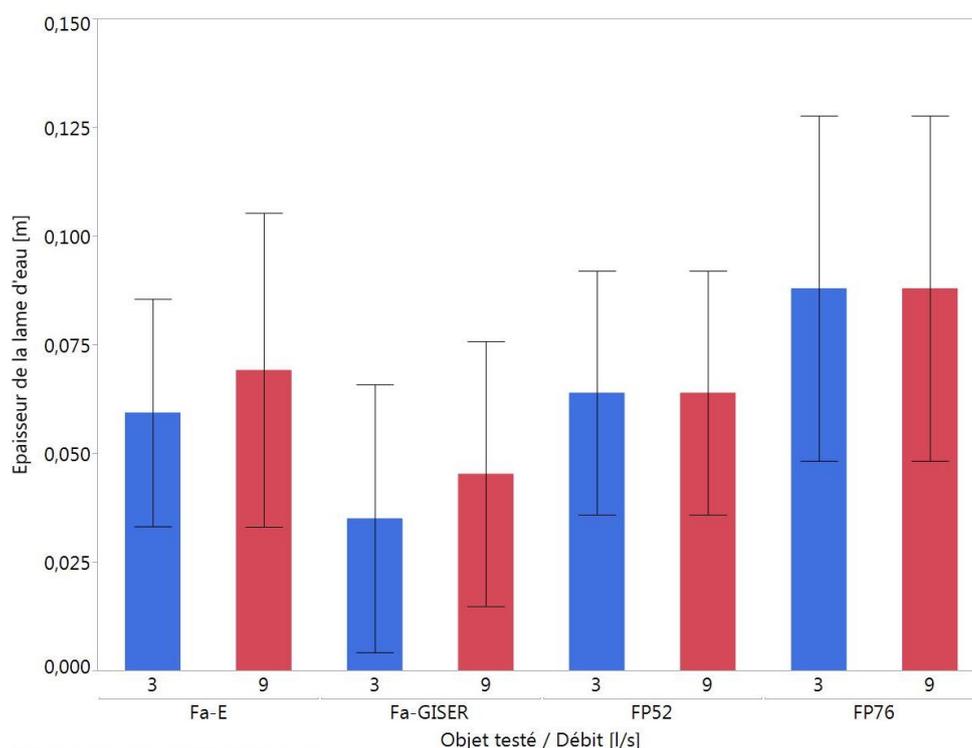


Figure 44 : ÉPAISSEUR DE LA LAME D'EAU DEVANT LA FASCINE EN FONCTION DE L'OBJET TESTÉ ET DU DÉBIT

³ Code significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

La Figure 44 résume les effets significatifs (objet testé – débit – interaction des deux). Les fascines GISER provoquent les lames d'eau les plus minces, suivies par les fascines entrepreneur et les fascines de paille les moins compactes. Enfin, les fascines de paille les plus compactes (FP76) engendrent les plus grosses lames d'eau. La hauteur d'eau mesurée juste devant la fascine est le reflet de sa résistance hydraulique. Les fascines GISER étant plus poreuses et ayant moins de branches fines, il semble cohérent qu'elles offrent également une moindre résistance que les fascines entrepreneur. De même, la plus grande compacité des filtres FP76 explique la hauteur d'eau plus importante que pour les filtres FP52.

L'effet du débit dépend de l'objet examiné. Pour les fascines de branchages, un plus grand débit provoque une lame d'eau plus épaisse. Pour les filtres à paille par contre, le débit ne semble pas influencer l'épaisseur de la lame d'eau.

✓ *Influence des facteurs mesurés sur l'épaisseur de la position du ressaut hydraulique*

À nouveau, l'ANOVA révèle un impact significatif du débit, de l'objet testé et de leur interaction (Tableau 17). A nouveau, la concentration n'intervient pas ici étant donné que ces résultats ont été obtenus par des tests à l'eau claire.

Tableau 17 : RÉSULTAT DE L'ANOVA SUR LES FACTEURS EXPLICATIFS DE LA DISTANCE ENTRE LA FASCINE ET LA POSITION DU RESSAUT HYDRAULIQUE

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)
débit	260.6532	1	< 2e-16 ***
objet	94.2475	3	< 2e-16 ***
débit : objet	10.6008	3	0.0148 *

La Figure 45 montre le même effet de l'objet testé et du débit sur la position du ressaut que sur l'épaisseur de la lame d'eau devant la fascine (Figure 44). Une hauteur d'eau plus importante se traduit par une position plus éloignée du ressaut hydraulique comme le montre la Figure 46. Pour les fascines de branchages, un débit plus important se traduit par un ressaut plus éloigné de la fascine. Pour les fascines de paille, il n'y a pas d'effet visible du débit.

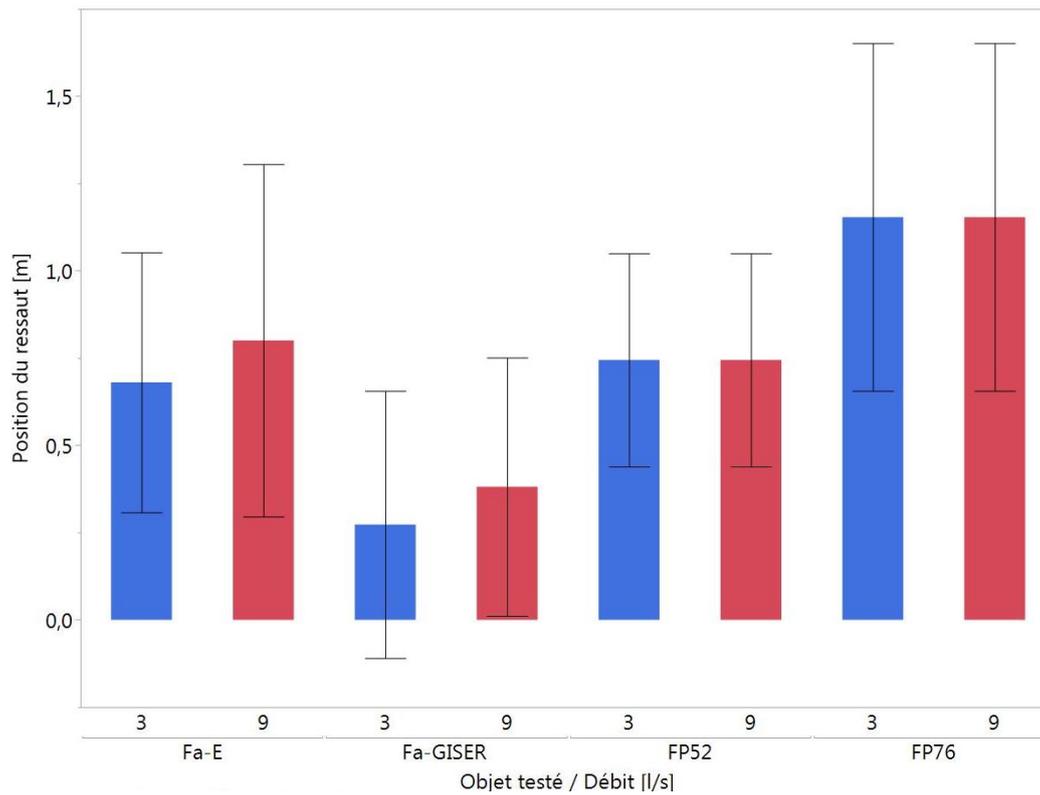


Figure 45 : POSITION DU RESSAUT HYDRAULIQUE SELON L'OBJET TESTÉ ET LE DÉBIT

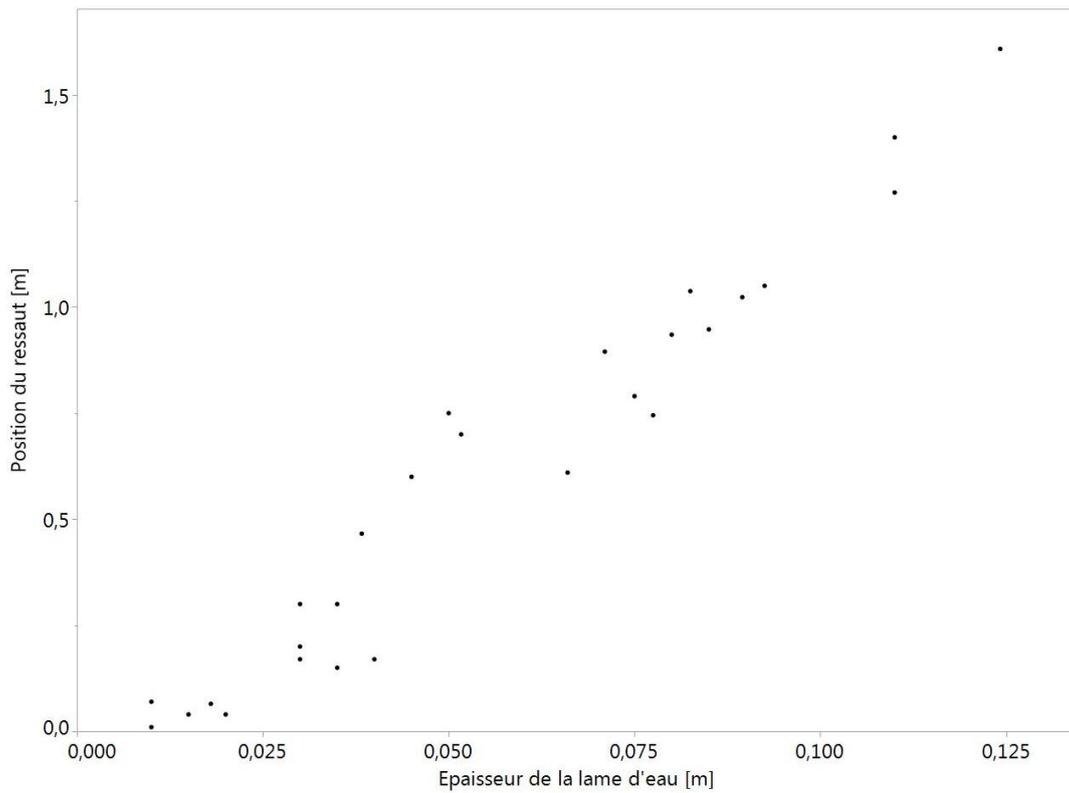


Figure 46 : RELATION ENTRE LA POSITION DU RESSAUT ET L'ÉPAISSEUR DE LA LAME D'EAU DEVANT LA FASCINE

✓ **Influence des facteurs mesurés sur l'épaisseur de la position du ressaut hydraulique**

Le coefficient de Manning a été calculé pour chaque objet, d'après les mesures expérimentales de hauteur d'eau pour 4 débits différents : 1 – 3 – 5 – 7 L.s⁻¹. Ces mesures ont été effectuées lors de tests à l'eau claire menés avant chaque expérience en vue de caractériser l'objet en place.

Comme pour les autres variables examinées, une ANOVA a été réalisée pour détecter les facteurs ayant un impact significatif sur le coefficient de Manning. Et ici encore, le débit, l'objet testé et leur interaction sont significatifs (Tableau 18).

Tableau 18 : RÉSULTATS DE L'ANOVA SUR LES FACTEURS EXPLICATIFS DU COEFFICIENT DE MANNING

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)
débit	477.145	1	< 2.2e-16 ***
objet	91.790	3	< 2.2e-16 ***
débit : objet	11.658	3	0.008651 **

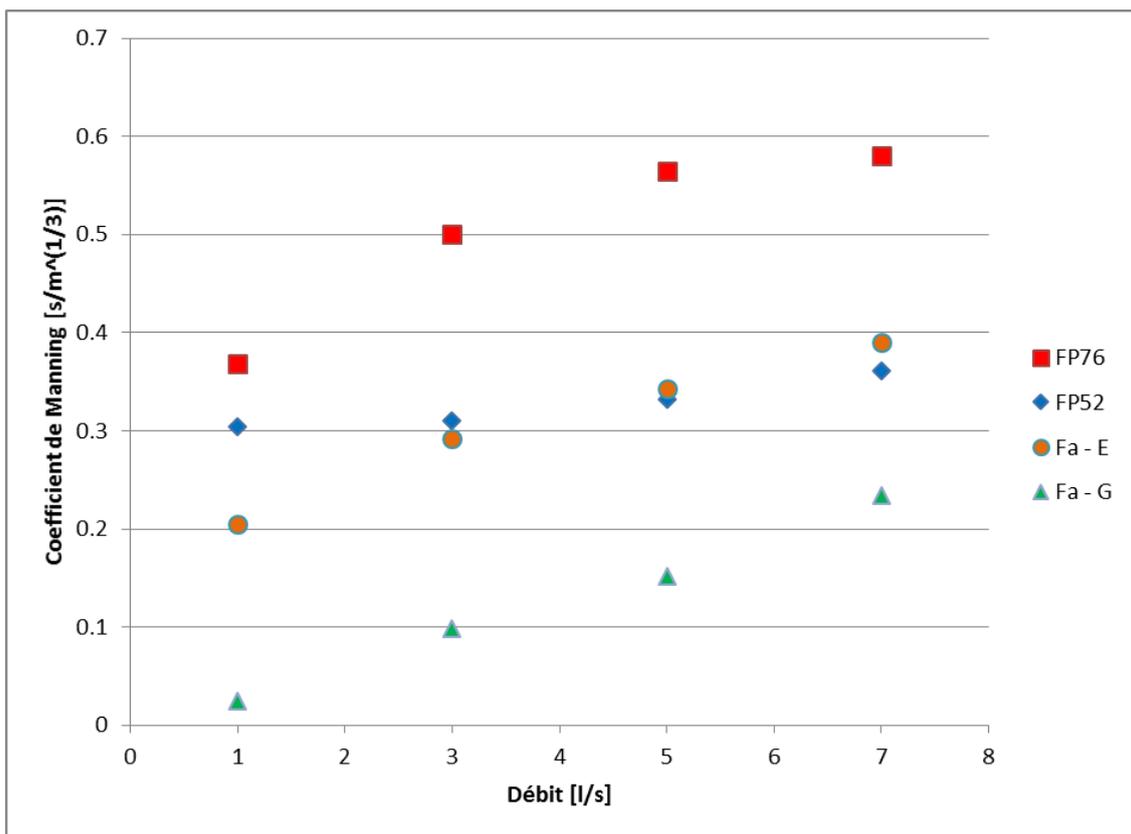


Figure 47 : COEFFICIENT DE MANNING EN FONCTION DU DÉBIT ET DE L'OBJET TESTÉ

La Figure 47 présente ces résultats pour chaque type d'objet en fonction du débit. Les fascines GISER ont les moins bons coefficients de Manning. Les fascines E et fascines de paille moins compactées se partagent le milieu de graphique. Les fascines de paille les plus compactées occupent le haut du graphique, avec les coefficients les plus importants. Elles sont donc les meilleurs freins hydrauliques. Nous remarquons également que le coefficient de Manning

semble évoluer avec le débit. Peut-être est-ce dû à l'utilisation un peu tronquée qui en est fait ici, mais une dépendance du coefficient de Manning au débit est également rapportée dans la littérature. L'analyse de ce phénomène est en cours, en collaboration avec des hydrauliciens de l'UCL. En outre, les valeurs présentées ici sont des moyennes sur plusieurs répétitions, et la variabilité entre 2 répétitions sur un même objet est parfois assez élevée.

Les gammes obtenues s'étendent de 0,02 à 0,45 s.m^{-1/3} pour les fascines de branchages. L'AREAS, avec le même calcul, et pour des fascines de branchages uniquement, obtient des valeurs comprises entre 0,06 et 3 s.m^{-1/3}, pour une gamme de débit s'étendant de 0,5 à 12 L.m⁻¹s⁻¹. Leurs valeurs semblent également être influencées par le débit.

De plus amples investigations sont en cours afin de mieux étudier l'utilisation du coefficient de Manning, et pouvoir tirer des informations plus rigoureuses de nos résultats.

✓ Influence des facteurs mesurés sur la répartition spatiale du dépôt

L'ANOVA (Tableau 19) met en évidence de multiples effets significatifs. Le débit et la longueur (distance à la fascine) sont directement significatifs. Les interactions de deuxième ordre entre concentration et objet, concentration et longueur, objet et longueur ainsi que celle de troisième ordre entre concentration, objet et longueur sont toutes significatives également.

Tableau 19 : RÉSULTAT DE L'ANOVA SUR LES FACTEURS EXPLICATIFS DE LA RÉPARTITION SPATIALE DES SÉDIMENTS (SELON LA DISTANCE À LA FASCINE = LONGUEUR)

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	
(Intercept)	37.4940	1	9.169e-10	***
Débit	35.2173	1	2.949e-09	***
Concentration	2.3347	1	0.1265196	
Objet	1.0138	3	0.7979137	
Longueur	6.3602	1	0.0116711	*
Concentration : Objet	38.7848	3	1.928e-08	***
Concentration : Longueur	7.8917	1	0.0049663	**
Objet : Longueur	17.4603	3	0.0005683	***
Concentration: Objet : Longueur	93.6568	3	< 2.2e-16	***

La Figure 48 présente l'épaisseur du dépôt, exprimée en mm, selon la distance à la fascine, en cm et selon le débit. Nous remarquons que l'épaisseur du dépôt décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la fascine, mais pas de façon linéaire. En outre le maximum semble être entre 25 et 60 cm. Par ailleurs, un débit plus faible engendre un dépôt plus épais et moins étendu, plus groupé proche de la fascine. La variabilité des résultats reste cependant trop importante pour tirer des conclusions définitives.

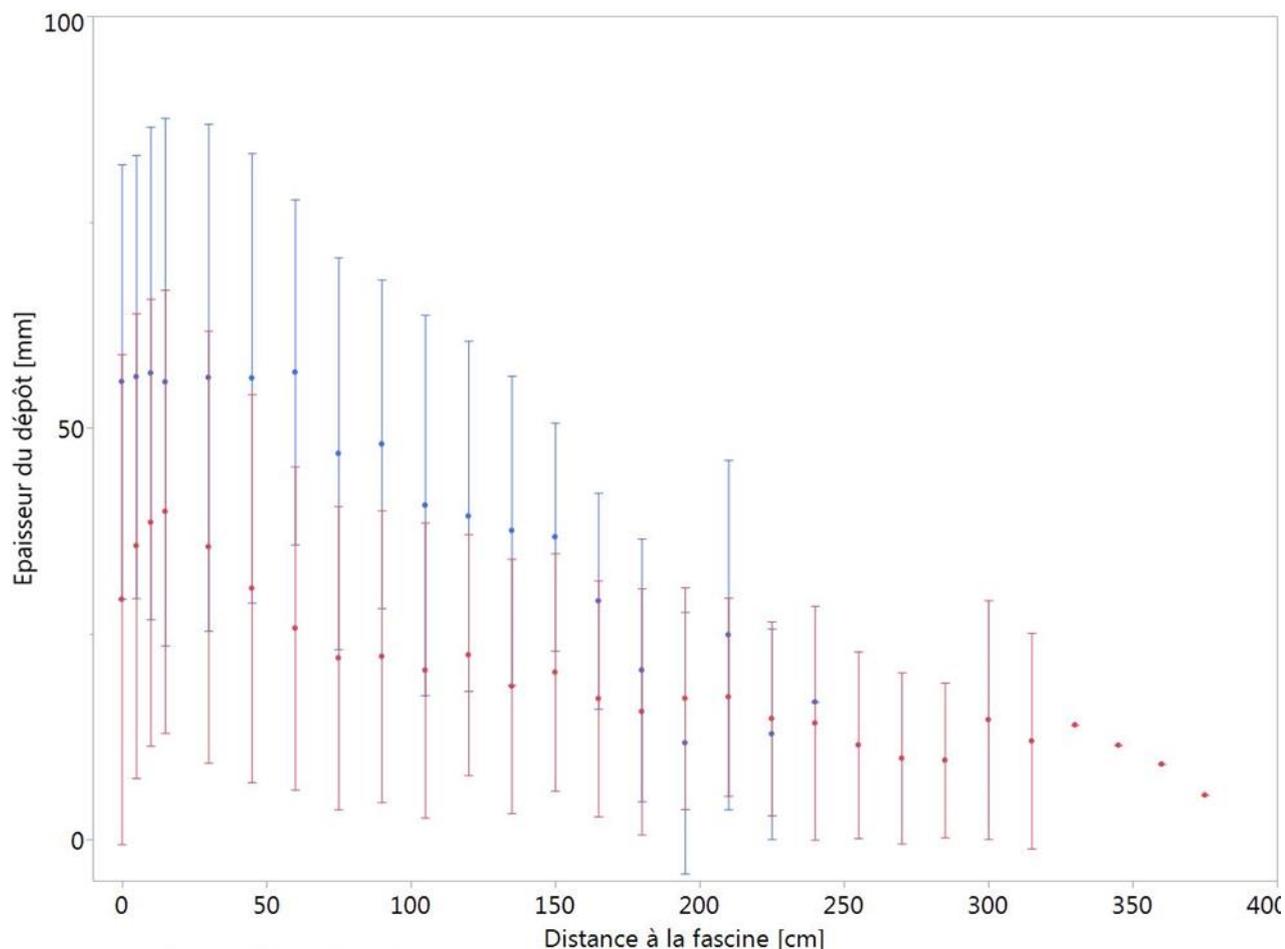


Figure 48 : ÉPAISSEUR MOYENNE DU DÉPÔT [mm] SELON LA DISTANCE À LA FASCINE [cm] ET LE DÉBIT, TOUS OBJETS ET CONCENTRATIONS CONFONDUS

La Figure 49 illustre l'interaction significative entre la distance à la fascine et le type d'objet testé. Les fascines de branchages provoquent un dépôt moins étendu que les fascines de paille.

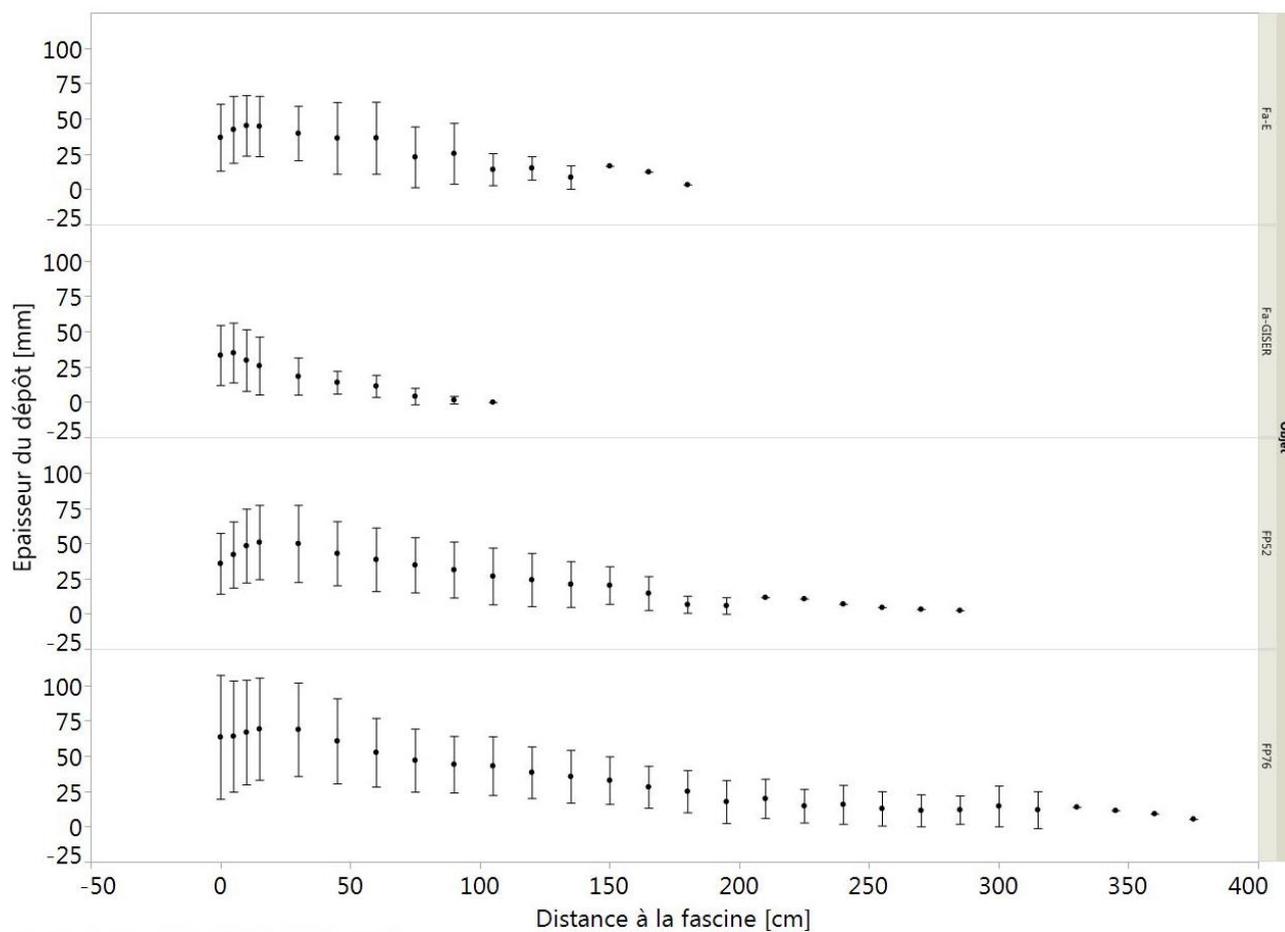


Figure 49 : ÉPAISSEUR MOYENNE DU DÉPÔT [mm] SELON LA DISTANCE À LA FASCINE [cm] ET LE TYPE D'OBJET (DE HAUT EN BAS : FA-E, FA-G, FP52 ET FP76), TOUS DÉBITS ET CONCENTRATIONS CONFONDUS

Enfin, la Figure 50 illustre l'interaction de troisième ordre entre la distance à la fascine, le type d'objet et la concentration.

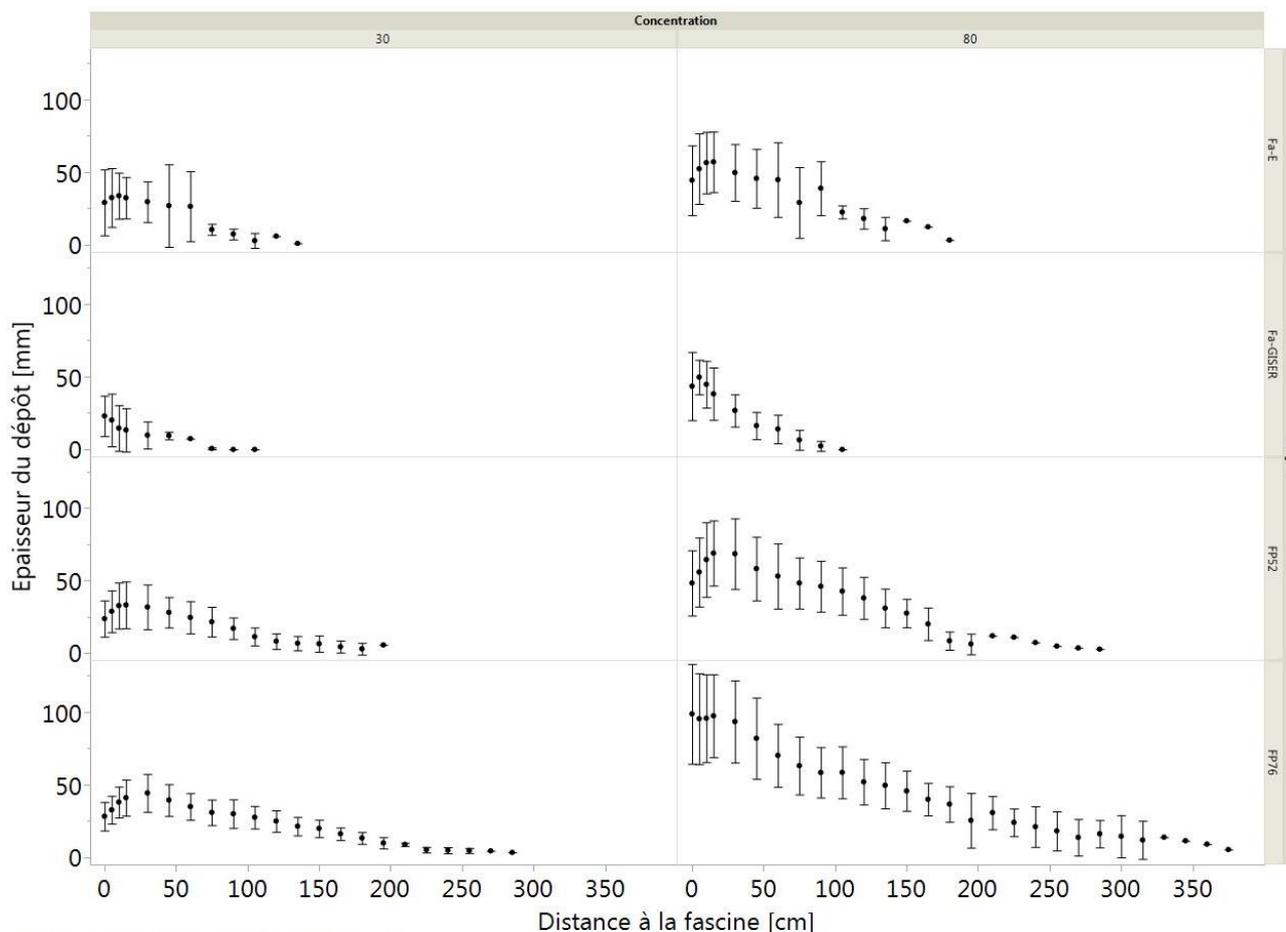


Figure 50 : ÉPAISSEUR MOYENNE DU DÉPÔT [mm] SELON LA DISTANCE À LA FASCINE [cm], LE TYPE D'OBJET ET LA CONCENTRATION [g.L⁻¹]

✓ **Corrélations**

Plusieurs corrélations ont été calculées afin d'établir les liens entre les différents paramètres mesurés ou calculés. Elles sont présentées au Tableau 20.

Tableau 20 : CORRÉLATION ENTRE LES DIFFÉRENTES VARIABLES CALCULÉES

	% déposé	% retenu	Porosité des fagots	Coefficient de Manning	Lame d'eau	Position du ressaut
% déposé	1	0,36	0,49	0,70	0,17	0,32
% retenu		1	0,05	0,10	-0,18	-0,11
Porosité des fagots			1	0,42	0,24	0,26
Coefficient de Manning				1	0,75	0,84
Lame d'eau					1	0,98
Position du ressaut						1

Ainsi, le pourcentage de dépôt dans le canal et le coefficient de Manning correspondant présentent une corrélation forte de 0,70. Un meilleur frein hydraulique engendre plus de dépôt dans le canal. La Figure 51 illustre cette relation et montre qu'elle n'est pas linéaire.

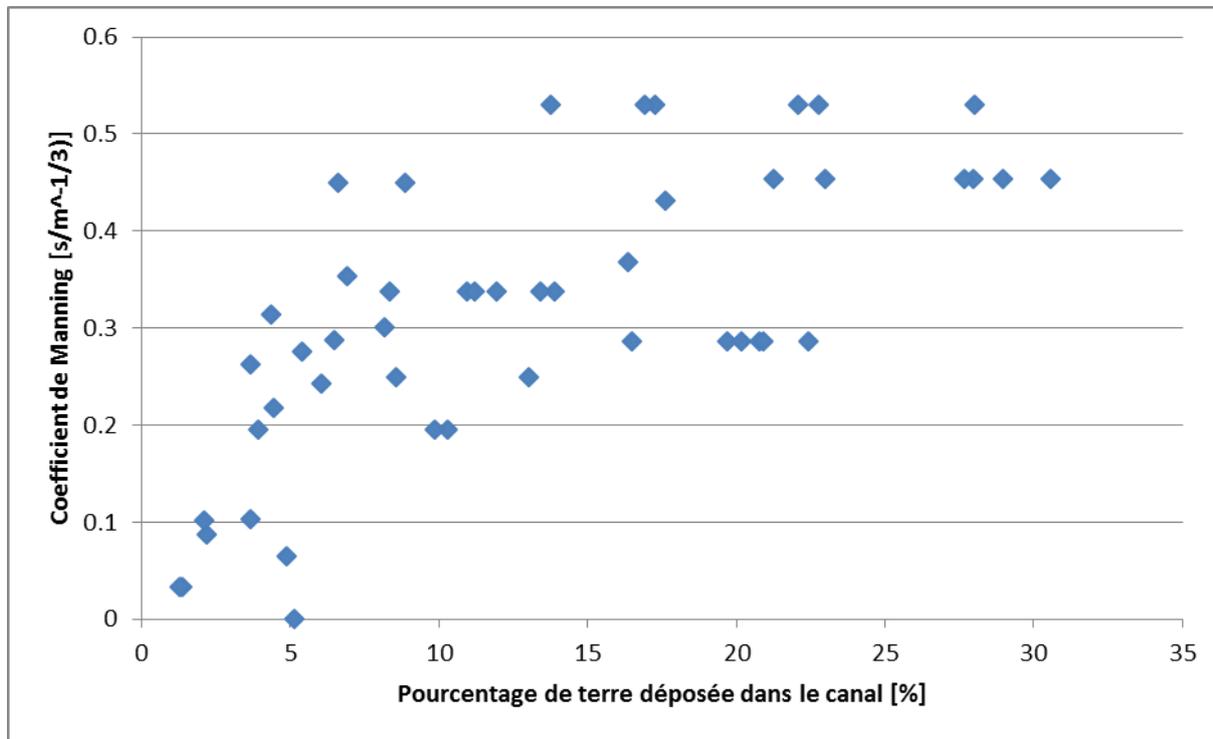


Figure 51 : CORRÉLATION ENTRE LE POURCENTAGE DE TERRE DÉPOSÉE ET LE COEFFICIENT DE MANNING

Les porosités calculées ont un coefficient de corrélation de 0,49 avec le pourcentage de terre déposée (Figure 52) et de 0,42 avec le coefficient de Manning. Pour rappel, seule la porosité des fascines de branchages a pu être calculée. Par conséquent, les corrélations incluant la porosité ne concernent que les fascines de branchages. La porosité semble donc être également un relativement bon indicateur de la performance moyenne d'un objet. Le taux de sédiments arrêtés par le dispositif (calculé par différence de concentration) semble être assez peu corrélé avec le pourcentage de déposition dans le canal (0,36) et encore moins avec le coefficient de Manning (0,1), sans doute parce qu'une partie de la rétention se fait dans la tranchée de la fascine et juste derrière les barrages filtrants.

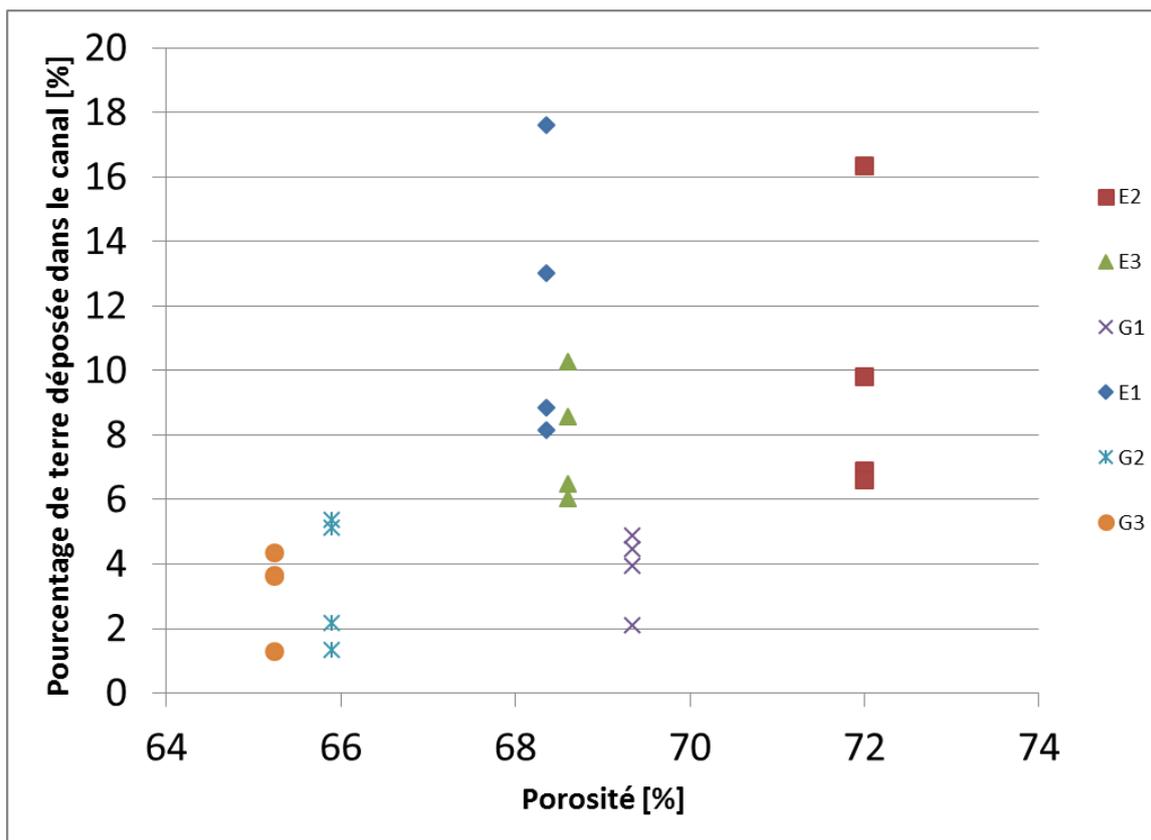


Figure 52 : POURCENTAGE DE TERRE DÉPOSÉE EN FONCTION DE LA POROSITÉ

✓ **Récapitulatif des résultats et discussion**

Le Tableau 21 offre une synthèse des résultats obtenus, d'après les différentes méthodes utilisées et par expérience. La quantité de terre déposée est celle récupérée dans le canal tandis que la quantité de terre retenue est celle calculée par différence de concentrations à l'entrée et la sortie. Pour chaque combinaison de paramètres choisis, la table donne la moyenne et l'écart-type des résultats obtenus sur les trois répétitions.

À la lumière de ce tableau, nous pouvons remarquer que le pourcentage de terre retenue varie moins d'une expérience à l'autre que le pourcentage de terre déposée, ce qui correspond bien aux résultats des ANOVA réalisées (ni le débit, ni la concentration, ni le type d'objet n'a d'impact significatif sur le pourcentage de terre retenue). Ce résultat peut s'expliquer par la fosse dans laquelle est enchâssé l'objet testé. Celle-ci piège des sédiments qui y aboutissent et engendre ainsi normalement un pourcentage de rétention plus important que le pourcentage déposé. Il semble donc que le pourcentage de terre qui passe outre cette fosse est peu influencé par le type d'expérience mené. Cette fosse lisse en quelques sortes les résultats obtenus. Il pourrait être intéressant de tester l'impact de la fosse seule, dans différentes conditions, afin de déterminer s'il est significatif.

Tableau 21 : RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS ; POURCENTAGES ET MASSES DE TERRE DÉPOSÉE ET RETENUE

Objet testé	Débit [L.s ⁻¹]	Concentration [g.L ⁻¹]	Moyenne de terre	Écart-type de terre	Moyenne de terre	Écart-type de terre
			déposée [%]	déposée [%]	retenue [%]	retenue [%]
Fa-E	3	30	13,2166	3,0397	25,5070	4,8376
		80	12,0066	4,8847	23,7997	8,0859
	9	30	7,0466	1,0656	18,9354	2,8180
		80	7,3233	1,3234	22,8958	5,4283
Fa-GISER	3	30	2,1933	1,5129	18,9194	2,3557
		80	3,58	1,3527	19,3821	2,2252
	9	30	3,8633	1,5844	21,5871	4,0494
		80	4,5	0,8706	19,5826	5,6101
FP52	3	30	18,9833	2,2354	25,5869	6,5015
		80	21,1533	1,1511	26,1383	7,6338
	9	30	13,0766	1,0144	26,9868	20,7064
		80	10,1766	1,5790	22,2818	15,6893
FP76	3	30	29,1566	1,3100	35,9702	10,1954
		80	23,9666	3,3147	25,9114	4,4814
	9	30	20,71	2,9996	19,0950	1,4650
		80	19,5633	7,4667	15,8002	4,9891
Objet testé	Débit [L.s ⁻¹]	Concentration [g.L ⁻¹]	Masse moyenne de terre déposée [kg]	Écart-type de terre déposée [kg]	Masse de terre retenue [kg]	Écart-type de terre retenue [kg]
Fa-E	3	30	6,7530	2,0349	13,1096	4,3895
		80	14,9684	4,9851	29,6138	7,6892
	9	30	3,665	0,6803	9,8096	1,4039
		80	10,8642	1,6567	33,8868	7,0293
Fa-GISER	3	30	1,0930	0,8819	8,8732	0,1517
		80	3,7974	1,7327	20,3058	4,9255
	9	30	2,0552	0,9896	11,0632	1,2871
		80	6,0992	1,0172	26,8836	9,0877
FP52	3	30	9,5701	1,3107	13,4048	4,0226
		80	26,7860	3,4072	33,4397	12,8311
	9	30	5,0801	1,2310	10,3125	8,8846
		80	13,7187	1,0889	30,3884	20,2330
FP76	3	30	14,6922	0,9097	18,0181	5,5989
		80	31,5211	5,6926	33,8838	7,1293
	9	30	9,2226	0,8762	8,5830	1,2457
		80	27,3806	10,9200	22,0784	7,1794

Par ailleurs, les effets de la concentration sur les différents résultats obtenus ne semblent pas déterminants (sauf en ce qui concerne la répartition spatiale du dépôt). Nous pouvons donc nous demander dans quelle mesure le maintien de ce facteur 'concentration' est nécessaire lors de futures expériences. Nous observons néanmoins dans le Tableau 21 que la concentration semble avoir un impact sur les écart-types : les écarts-types des expériences à 80 g.L⁻¹ semblent plus importants que pour la même expérience à 30 g.L⁻¹ (pour 12 des 16 expériences réalisées). Un approfondissement statistique pourrait être mené ici afin de déterminer l'intérêt de poursuivre avec la concentration comme variable.

Enfin, il semble évident d'après ces résultats que les fascines de paille sont plus efficaces que les fascines de branchages, en termes de pourcentage de terre déposée. Afin d'entériner cette meilleure efficacité, il conviendrait de pousser les expériences plus en avant afin de trouver un moyen d'étudier le vieillissement de chaque objet. En outre, une étude avec une composante économique pourrait être menée, avec pour objectif une vision globale sur plusieurs années de la mise en place d'un barrage filtrant.

4.3.6. Conclusions et perspectives

Les premières expériences visant à quantifier l'efficacité de rétention de terre des barrages filtrants permettent de dégager plusieurs informations précieuses. Tout d'abord, la fascine de type GISER ne semble pas être suffisamment performante pour que la sélection minutieuse de chaque branche vaille la peine d'être faite. Ensuite, les fascines de paille sont plus performantes que celle de branchage. Le débit, comme attendu, impacte fortement le dépôt, et la concentration choisie influence seulement la répartition du cône de sédimentation et non le pourcentage de sédiments déposés. Nous pouvons par conséquent nous demander si l'étude de différentes concentrations vaut la peine d'être poursuivie lors de prochaines expériences vu le peu d'influence de ce facteur sur la proportion de terre déposée ou retenue.

Cette première utilisation du coefficient de Manning, comme indicateur comparatif calculé expérimentalement, semble convenir et permet des comparaisons satisfaisantes avec l'AREAS. Il importe cependant de rester prudent quant aux fondements théoriques de cette équation et son utilisation dans le contexte des expériences réalisées ici.

Les résultats de porosités semblent moins à même d'expliquer les différences de pourcentages entre expériences que le coefficient de Manning. Des analyses plus poussées pourraient être menées pour mieux cerner la pertinence de la porosité, qui exprime – au même titre que le coefficient de Manning – une résistance à l'écoulement.

Des analyses de type plus économiques pourraient également être menées afin de déterminer l'objet présentant le meilleur rapport coût-bénéfice sur le court, moyen et long terme.

En outre, les expérimentations suivantes pourraient tester et caractériser d'autres types de barrages filtrants comme un bac à broyat, des gabions, une double rangée de panneaux tressés en noisetier type « BRICO », du géotextile ou encore un boudin de rétention de coco.

4.3.7. Bibliographie

Magnard A., Bielders C., *Réduire le ruissellement et l'érosion en culture de pommes de terre*. Rapport d'essais. Projet PROSENSOLS. Université catholique de Louvain. 21 p., 2009

Ouvry JF., Richet JB., Bricard O., Lhérieu M., Bouzid M., Saunier M., 2012. *Fascines et haies pour réduire les effets du ruissellement érosif : caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation*, Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols (AREAS)

Steege, A., Govers, G., Nachtergaele, J., Takken, I., Beuselinck, L., & Poesen, J. (2000). *Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium*. *Geomorphology*, 33(1-2), 25–36. doi:10.1016/S0169-555X(99)00108-7

4.3.8. Annexes

Annexe 1 : Valeurs extrêmes pluvieuses estimées pour une gamme de périodes de retour (T) comprises entre 2 mois et 200 ans et une gamme de durées (D) comprises entre 10 min et 1 mois pour la commune de Gembloux

D \ T	2 mois	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans	200 ans
10 min	4	5.1	7.1	9.1	11.2	13.8	15.9	18	19.2	20.7	22.8	24.9
20 min	5.4	6.9	9.6	12.2	14.9	18.5	21.2	24	25.6	27.6	30.4	33.2
30 min	6.3	8	11.1	14.2	17.2	21.4	24.5	27.6	29.5	31.8	35	38.2
1 heure	7.9	10.1	13.7	17.4	21.2	26.1	29.9	33.7	35.9	38.7	42.6	46.5
2 heures	9.6	12.1	16.3	20.6	24.8	30.5	34.9	39.2	41.8	45	49.4	53.9
6 heures	12.6	15.5	20.4	25.4	30.4	37	42.1	47.2	50.2	54	59.1	64.3
12 heures	15	18.1	23.5	28.9	34.4	41.6	47.1	52.7	56	60.1	65.8	71.4
1 jour	18.1	21.6	27.6	33.6	39.6	47.7	53.8	60	63.6	68.2	74.5	80.8
2 jours	22.7	26.7	33.6	40.5	47.4	56.6	63.7	70.8	74.9	80.2	87.4	94.6
3 jours	26.5	30.9	38.5	46.1	53.8	64	71.8	79.6	84.2	90.1	98	106
4 jours	29.9	34.7	42.9	51.2	59.5	70.6	79.1	87.5	92.5	98.9	107.5	116.1
5 jours	33	38.2	47	55.9	64.8	76.7	85.7	94.8	100.2	107	116.2	125.5
7 jours	38.8	44.6	54.5	64.4	74.5	87.8	98	108.2	114.2	121.8	132.2	142.6
10 jours	46.7	53.3	64.6	76.1	87.6	103	114.5	126.3	133.2	141.9	153.8	165.7
15 jours	58.6	66.5	80	93.6	107	126	139.3	153.3	161.5	171.9	186	200.3
20 jours	69.6	78.6	94.1	110	125	146	162	178	187.3	199.2	215.4	231.7
25 jours	80.1	90.2	107.4	125	142	166	183.3	201.1	211.6	224.8	242.9	261.1
30 jours	90.2	101.2	120.2	139	159	184	203.5	223.1	234.7	249.2	269.1	289.1

Source : Service Public de Wallonie, direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques, rubrique Hydrologie données et statistique, extrêmes pluvieux

Annexe 2 : Gamme de débits de pointe ($L \cdot s^{-1} \cdot (mètre\ linéaire)^{-1}$) estimés par la méthode « Curve number SCS »

Superficie [ha]	Periode de retour [an]	Pente [%]	Débit [L/s/ml]		
			Longueur fascine [m]		
			15	25	40
2	0.5	3	0.9	0.6	0.4
		5	1.2	0.7	0.5
		10	1.7	1.0	0.6
	2	3	3.1	1.9	1.2
		5	4.0	2.4	1.5
		10	5.7	3.4	2.1
	5	3	5.1	3.1	1.9
		5	6.6	4.0	2.5
		10	9.3	5.6	3.5
	10	3	6.9	4.1	2.6
		5	8.9	5.3	3.3
		10	12.5	7.5	4.7
	25	3	8.8	5.3	3.3
		5	11.4	6.8	4.3
		10	16.1	9.7	6.0
	50	3	11.6	7.0	4.4
		5	15.0	9.0	5.6
		10	21.2	12.7	7.9
5	0.5	3	1.6	1.0	0.6
		5	2.1	1.3	0.8
		10	3.0	1.8	1.1
	2	3	5.4	3.3	2.0
		5	7.0	4.2	2.6
		10	9.9	5.9	3.7
	5	3	8.9	5.3	3.3
		5	11.5	6.9	4.3
		10	16.2	9.7	6.1
	10	3	11.9	7.1	4.5
		5	15.3	9.2	5.8
		10	21.7	13.0	8.1
	25	3	15.3	9.2	5.7
		5	19.7	11.8	7.4
		10	27.9	16.7	10.5
	50	3	20.1	12.1	7.5
		5	26.0	15.6	9.7
		10	36.7	22.0	13.8
10	0.5	3	2.5	1.5	0.9
		5	3.2	1.9	1.2
		10	4.5	2.7	1.7
	2	3	8.2	4.9	3.1
		5	10.6	6.4	4.0
		10	15.0	9.0	5.6
	5	3	13.4	8.1	5.0
		5	17.4	10.4	6.5
		10	24.5	14.7	9.2
	10	3	18.0	10.8	6.8
		5	23.2	13.9	8.7
		10	32.9	19.7	12.3
	25	3	23.1	13.9	8.7
		5	29.9	17.9	11.2
		10	42.3	25.4	15.8
	50	3	30.5	18.3	11.4
		5	39.3	23.6	14.8
		10	55.6	33.4	20.9

Superficie [ha]	Periode de retour [an]	Pente [%]	Débit [L/s/ml]			
			Longueur fascine [m]			
			15	25	40	
25	0.5	3	4.3	2.6	1.6	
		5	5.5	3.3	2.1	
		10	7.8	4.7	2.9	
	2	3	14.3	8.6	5.3	
		5	18.4	11.0	6.9	
		10	26.0	15.6	9.8	
	5	3	23.3	14.0	8.7	
		5	30.1	18.0	11.3	
		10	42.5	25.5	16.0	
	10	3	31.2	18.7	11.7	
		5	40.3	24.2	15.1	
		10	57.0	34.2	21.4	
	25	3	40.1	24.1	15.0	
		5	51.8	31.1	19.4	
		10	73.2	43.9	27.5	
	50	3	52.8	31.7	19.8	
		5	68.2	40.9	25.6	
		10	96.4	57.8	36.1	
	50	0.5	3	6.5	3.9	2.4
			5	8.4	5.0	3.1
			10	11.9	7.1	4.5
		2	3	21.6	13.0	8.1
			5	27.9	16.7	10.5
			10	39.5	23.7	14.8
5		3	35.3	21.2	13.2	
		5	45.6	27.4	17.1	
		10	64.5	38.7	24.2	
10		3	47.3	28.4	17.7	
		5	61.1	36.6	22.9	
		10	86.3	51.8	32.4	
25		3	60.8	36.5	22.8	
		5	78.5	47.1	29.4	
		10	111.0	66.6	41.6	
50		3	80.0	48.0	30.0	
		5	103.3	62.0	38.7	
		10	146.1	87.7	54.8	

5. Revue bibliographique sur les différentes méthodes de quantification des processus d'érosion hydrique, dont principalement la redéposition

5.1. Résumé

L'érosion hydrique, de manière générale, fait intervenir différents processus, à savoir le détachement de particules de sol, le transport vers l'aval de ces particules, ainsi que leur redéposition.

Ces phénomènes peuvent être étudiés au niveau d'une parcelle individuelle, tout comme à l'échelle d'un bassin versant. De la même manière, nous pouvons examiner les différents processus d'érosion lors d'un évènement pluvieux en particulier, ou au contraire, les observer sur le long-terme. Une multitude de méthodes existent pour caractériser le phénomène d'érosion hydrique. Certaines sont à utiliser dans des contextes/problématiques particuliers, tandis que d'autres ont des formulations bien plus générales.

Un inventaire des modèles et autres méthodes existant aujourd'hui pour caractériser l'érosion hydrique au sens large a ainsi été mis à jour, afin d'être le plus exhaustif possible, avec une importance particulière accordée à la modélisation de la redéposition. Cet inventaire doit permettre de rapidement déterminer quel est le modèle (ou la combinaison de modèles) le plus approprié pour différentes applications développées dans le cadre de GISER. L'ensemble des références bibliographiques a été rassemblé dans une base de données « Zotero », disponible en annexe de ce rapport.

5.2. Introduction

L'érosion hydrique, de manière générale, fait intervenir différents processus, à savoir le détachement de particules de sol, le transport vers l'aval de ces particules, ainsi que leur redéposition.

Ces phénomènes peuvent être étudiés au niveau d'une parcelle individuelle, tout comme à l'échelle d'un bassin versant. De la même manière, nous pouvons examiner les différents processus d'érosion lors d'un évènement pluvieux en particulier, ou au contraire, les observer sur le long-terme. Une multitude de méthodes existent pour caractériser le phénomène d'érosion hydrique. Certaines sont à utiliser dans des contextes/problématiques particuliers, tandis que d'autres ont des formulations bien plus générales.

Dans le contexte du calcul des risques d'érosion, les calculs réalisés à ce jour dans le cadre de GISER se sont focalisés sur le détachement et le transport. La composante déposition n'était pas prise en compte. Cela se traduit par une surestimation de la quantité de terre exportée.

La caractérisation de la redéposition est par ailleurs importante pour l'étude des parcelles responsables de coulées boueuses sur des récepteurs de risque en aval lors d'événements pluvieux intenses. En effet, une parcelle avec haut potentiel d'érosion peut ne pas être responsable de l'arrivée de sédiments sur un récepteur de risque en raison de la redéposition des sédiments transportés en amont du récepteur.

La redéposition peut être prise en compte explicitement, via une description des processus, ou implicitement, via le calcul du rendement en sédiment d'une zone (= quantité nette de terre exportée). Le but de ce travail était de documenter les différentes approches disponibles dans la littérature, en lien avec la description des processus de détachement et transport.

5.3. Objectifs poursuivis

Le but de ce travail est de réaliser un inventaire le plus exhaustif possible des modèles et autres méthodes existant aujourd'hui pour caractériser l'érosion hydrique au sens large, avec une importance particulière accordée à la modélisation de la redéposition.

Cet inventaire doit permettre de rapidement déterminer quel est le modèle ou la combinaison de modèles le plus approprié pour différentes applications développées dans le cadre de GISER.

5.4. Classification des modèles

Nous avons veillé, lors de la rédaction du tableau comparatif, à séparer les différents modèles en plusieurs classes distinctes. Cette démarche permet au lecteur de directement se diriger vers le type de modèle qui l'intéresse.

Nous avons premièrement créé deux types de classification. La première classification s'intéresse à la méthode utilisée pour caractériser le détachement des particules de sol. La seconde classification, elle, s'intéresse à la manière dont la redéposition des sédiments est modélisée.

Les différents types de modèles repris dans ces classifications sont les suivants :

I. Modélisation du détachement et transport des particules de sol (colonne « E* »)

- | | |
|------------------------|------------------------|
| 1) Type USLE | 4) Type physique |
| 2) Type « Indice » | 5) Type « Régression » |
| 3) Type « Classement » | 6) Autres |

II. Modélisation de la redéposition des sédiments (colonne « D* »)

- | | |
|------------------------|---------------------|
| 0) Non considérée | |
| 1) Type AGNPS – RUSLE2 | 4) Type « Indices » |
| 2) Type WATEM / SEDEM | 5) Type « Seuils » |

3) Type physique

6) Type USPED

III. **Autres propriétés (dans le tableau)**

Plusieurs autres caractéristiques importantes et propres à chaque modèle, telle que leurs échelles spatiale et temporelle, leurs inputs et outputs, leur objectif principal, ou encore leur type (conceptuel, empirique, physique), sont reprises dans le tableau comparatif.

Un mot d'explication sur les différents types de modèles cités dans chacune des deux classifications est donné ci-dessous. Plus de détails sur les principaux modèles utilisés dans la littérature sont repris dans des « fiches » en annexe de ce chapitre.

5.4.1. **Classification n°1 : Détachement et transport des particules de sol**

✓ **Type USLE – Universal Soil Loss Equation**

Il s'agit d'un modèle de type empirique, décrit par Wischmeier et Smith, 1978, sur base d'expériences sur de très nombreuses parcelles aux États-Unis. Ce modèle permet de quantifier le taux d'érosion à long-terme sur une pente considérée à l'aide d'une équation simple (Équation 10).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (10)$$

avec **A** le taux d'érosion [$T.(ha.an)^{-1}$], **R** l'érosivité de la pluie [$(MJ.mm).(ha.h.an)^{-1}$], **K** l'érodibilité du sol [$(T.h).(mm.MJ)^{-1}$], **LS** le facteur de longueur et raideur de pente [-], **C** le facteur de couverture et de gestion du sol [-], et **P** le facteur de pratiques antiérosives [-].

Cette équation est sans nul doute la manière la plus commune de quantifier l'érosion hydrique de par le monde. Sa popularité est liée à la demande faible en données d'entrées et à sa formulation simple. Cependant, la méthode USLE reste empirique, et possède de nombreuses limites (Prasuhn 2013).

✓ **Type « Indices »**

Dans cette rubrique, nous avons repris les modèles qui utilisent des indices pour quantifier les processus d'érosion. Nous y retrouvons les modèles utilisant l'indice de connectivité des sédiments de Borselli, 2008.

✓ **Type « Classement »**

Nous retrouvons ici des modèles de type « semi-quantitatifs », caractérisant l'érosion à l'aide de « scores » donnés à plusieurs paramètres tels que la topographie, la végétation, le sol, la pluie, etc.

✓ **Type physique**

Les modèles de type physique tentent d'intégrer toute la complexité des processus intervenant dans le phénomène d'érosion. Ils font généralement appel à des équations physiques visant à quantifier précisément chacun des mécanismes impliqués dans l'érosion hydrique. Les modèles physiques font appel à un nombre considérable de paramètres, souvent difficilement accessibles à l'échelle d'un bassin versant.

✓ Type régression

Ces modèles tentent de déterminer la relation liant l'érosion à un ensemble de paramètres aux valeurs variables. Nous retrouvons des modèles de régression linéaire tout comme non-linéaires.

✓ Autres

Nous avons ici regroupés les modèles ne pouvant être classés dans les classes précédentes. Il peut s'agir de combinaison de modèles, ou de modèles pour lesquels la quantification de l'érosion n'est pas l'objectif premier.

5.4.2. Classification n°2 : Déposition des particules de sol

✓ Non considérée

Dans cette classe sont regroupés les modèles négligeant la redéposition des sédiments.

✓ Type AGNPS – RUSLE2

Les modèles inclus dans cette classe sont de type plus « physique ». En effet, ils font appel à un nombre considérable de paramètres en entrée. Les équations utilisées pour calculer la redéposition des sédiments sont très semblables au sein de cette classe de modèles. Elles font intervenir notamment la vitesse de sédimentation et la charge en sédiments (Équations 11 & 12).

$$TC = k_t \times \zeta \times q_p \times \sin(\theta) \quad (11)$$

$$D = \frac{\alpha_d V_f}{q_p} \times (TC - g) \quad (12)$$

avec **TC** la capacité de transport [$\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$], **k_t** le coefficient de transport [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], **ζ** un coefficient de résistivité hydraulique [-], **q_p** le débit de run-off caractéristique [$\text{m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$], **θ** la raideur de pente [°], **D** le taux de déposition [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], **α_d** le coefficient de déposition (à calibrer), **V_f** la vitesse de sédimentation des sédiments [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], et **g** la charge en sédiments [$\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$].

✓ Type « WATEM / SEDEM »

Cette classe ne comprend que le modèle WATEM / SEDEM. En effet, les équations utilisées pour calculer la redéposition des sédiments sont uniques à ce modèle. Elles font intervenir un coefficient de capacité de transport, qui est le seul paramètre à calibrer pour utiliser ce modèle (Équation 13).

$$TC = k_{TC} \times R \times K \times [LS - a \times (b \times S_g^{0.8})] \quad (13)$$

avec **TC** la capacité de transport [$\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{an})^{-1}$], **k_{TC}** le coefficient de capacité de transport (à calibrer) [**m**], **R** l'érosivité de la pluie (voir USLE), **K** l'érodibilité du sol (voir USLE), **LS** les facteurs de longueur et de raideur de pente [-], **a** et **b** des coefficients fixés [-], et **S_g** le gradient de pente [$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$].

✓ **Type physique**

Nous avons repris dans cette classe l'ensemble des modèles physiques autres que ceux définis dans les deux classes précédentes.

✓ **Type « Indices »**

Dans cette rubrique, nous avons repris les modèles qui utilisent des indices pour quantifier les processus de redéposition des sédiments.

✓ **Type « Seuils »**

Cette classe reprend des modèles ne considérant la redéposition qu'à l'aide de seuils critiques de raideur ou de courbure de pente. Il s'agit d'une considération simplifiée de la redéposition.

✓ **Type USPED (Unit Stream Power Erosion and Deposition)**

Il s'agit d'un modèle physique basé sur la puissance de flux unitaire. Une caractérisation complète de ce modèle a été faite dans le « Work Paper n°4 » du rapport final de GISER en mars 2011.

5.5. Inventaire des modèles

Ci-dessous est repris le tableau récapitulatif des modèles rencontrés dans la littérature.

Dans ce tableau, nous retrouvons dans la première colonne le nom (ou abréviation) des différents modèles. Sont également reprises dans cette colonne les sources des informations présentes dans les colonnes suivantes. Si l'un des modèles de l'inventaire vous intéresse, nous vous invitons à parcourir les articles cités.

Les deux colonnes suivantes reprennent les deux types de classifications (E* et D*). Les différents modèles sont ordonnés prioritairement selon la première classification (E*), et ensuite selon la seconde classification (D*), toutes deux décrites précédemment.

Des informations générales sur les différents modèles sont présentes dans la colonne suivante, intitulée « Formulation ». La colonne « Type » indique la nature du modèle : conceptuel, empirique, physique, semi-quantitatif, etc. Nous retrouvons ensuite les informations quant aux données d'entrée nécessaires pour faire tourner le modèle (inputs) et aux données de sorties du modèle (outputs).

Finalement, les deux dernières colonnes indiquent les éventuels avantages et inconvénients propres à chaque modèle repris dans le tableau.

MODÈLES	E*	D*	Formulation	Type	Inputs	Outputs	Avantages	Défauts
dABAG <i>Flacke 1990</i>	1	0	= modèle USLE mais avec facteur pente modifié en TIN	Empirique	- Voir modèle USLE	- Voir modèle USLE	- Voir modèle USLE	- Voir modèle USLE
EMSS <i>Saavedra 2005</i>	1	0	Environmental Management Support System Ce modèle se sépare en 3 parties : Colobus (catchment model), Marmoset (routing model), et Mandrill (storage model) Échelle spatiale : BV	Conceptuel	Nombre raisonnable : - Pluie journalière - ETP mensuelle - Runoff journalier (stations) - Danger d'érosion du paysage - Land Use - Point source polluants - Lieux de stockage	- Runoff - Charges en sédiments	- Peu d'inputs	- Voir modèle USLE
MUSLE <i>Zhang 2008</i> <i>Sadeghi 2014</i> <i>Cardei 2010</i> <i>Sadeghi 2007</i>	1	0	Modified Universal Soil Loss Equation $S_y = [a \times (Q' \times q_p)^b] \times K \times LS \times C \times P = RUNOFF \times K \times LS \times C \times P$ Échelle spatiale conseillée : BV	Empirique	- MNT - Caractéristiques hydrologiques du sol - Land Cover - Raster C - Raster P - Raster K	Sediment Yield : [t/an] ou [t] (év. unique)	- Considère le runoff pour le calcul de l'érosion et non l'érosivité de la pluie (plus réaliste) - Applicable pour des événements pluvieux individuels - Interface ArcMUSLE dans ArcGIS	- Ne considère pas la redéposition - Coefficients a et b à calibrer à chaque situation
RUSLE <i>Kinnell 2010</i>	1	0	Revised Universal Soil Loss Equation $A = R \times K \times LS \times C \times P$ $R_e = E \times I_{30}$ $C = \frac{\sum_i SLR_i \times EI_i}{EI_t}$	Empirique	- Comme USLE mais facteurs modifiés	Taux d'érosion moyen sur la pente considérée [t/ha.an]	- Voir USLE - Permet au modèle d'être appliqué à des cultures et à des systèmes de gestion non compris dans le modèle USLE initial - Pour toutes les pluies (>< USLE)	- Voir modèle USLE
SEDNET <i>GISER – Modélisations 2015</i> <i>Prosser 2001</i>	1	0	Voir Prosser 2001 Échelle spatiale : grands BV Pas « event-based »	Empirique Conceptuel	20 faciles à obtenir dont : - MNT - Facteur R - Facteur K - Facteur LS - Facteur C - Facteur P	- Bilan de sédiments annuel moyen - Redéposition - Charge et redéposition des sédiments dans la rivière - Contribution relative du flux en amont	- Intégrable à un GIS - Représentation spatiale des sources et puits de sédiments	- Objectif premier = Déterminer la charge en sédiment dans les rivières - SEDNET = mélange de pleins de modèles différents - Beaucoup d'inputs
USLE <i>Alder S. 2015 (MUSLE87)</i> <i>Prasuhn 2013</i> <i>Kinnel 2005</i> <i>Amore 2004</i> <i>Kinnell 2010</i>	1	0	Universal Soil Loss Equation $A = R \times K \times LS \times C \times P$	Empirique	- Raster parcellaire - MNT - Raster R - Raster K - Raster C	Taux d'érosion moyen sur la pente considérée [t/ha.an]	- Internationalement utilisé - Formulation simple et connue - Paramétrisation faible - Intégrable à un GIS - Résultats indépendants de la taille du bassin étudié	- Considère l'érosivité de la pluie et pas du runoff, même si une corrélation existe entre les deux - Capacité limitée de prendre en considération les formes de pente complexes + paysage en 2D. - Ne considère pas la redéposition - Ne peut expliquer correctement le SY à l'échelle d'un BV ou à l'échelle d'un événement pluvieux - Pente = non-uniforme 1D - Surestime les faibles pertes annuelles de sol et sous-estime les fortes. - Valable uniquement avec >12.5mm, ou >6.25mm en moins de 15 minutes.
USLE-M <i>Kinnell 1998</i> <i>Kinnell 2001</i>	1	0	$A_{e;ij} = EI_{30} \times K_{UM;ij} \times L'_{e;ij} \times S_{i,j} \times C_{UM;ij} \times P_{UM;ij}$ avec $L'_{e;ij}$ définit avec le runoff coef. Utilisation du runoff ratio et de l'indice $EI_{30} \rightarrow$ « event-based »	Empirique	- Raster parcellaire - MNT - $Q_e EI_{30}$ - Raster K_{UM} - Raster C_{UM}	Event soil loss [t/ha]	- Utilisation d'un facteur de pente Desmet & Govers modifié (non-uniforme & 2D) - Utilise le run-off - Intégrable à un GIS - Plus précis que USLE/RUSLE, qui voient leur précision diminuer au plus la proportion d'infiltration de l'eau de pluie augmente.	- Facteur K et C ne sont pas ceux utilisés dans USLE : modification spécifique au modèle USLE-M est nécessaire - Ne considère pas la redéposition

<p>AGNPS (voir fiche)</p> <p>Haregeweyn 2003 Bosch 1998 Young 1989 GISER – Modélisations 2015 Merritt 2003 (tableau)</p>	1	1	<p>Agricultural Non-Point Source Pollution model</p> $D(x) = \frac{V_{ss}}{q(x)} \times [q_s(x) - g'_s(x)]$ $g'_s = \eta \times g_s = \eta \times k \times \frac{\tau v^2}{v_{ss}}$ <p>« Event-based » Échelle spatiale : petit BV (jusqu'à 20 000 hectares)</p>	Conceptuel Physique	400 paramètres	<ul style="list-style-type: none"> - Volume de ruissellement à chaque cellule - Zones sources 	<ul style="list-style-type: none"> - Considère la redéposition via capacité de transport - Tient compte de tous les types d'érosion 	<ul style="list-style-type: none"> - 5 classes de taille de particules : paramètre à connaître sur l'ensemble de l'aire étudiée - Lien entre le modèle et un GIS est encore à établir, même si AGNPS fonctionne déjà sur base de cellules - Le runoff est utilisé pour la redéposition mais pas pour l'érosion - Beaucoup d'inputs
<p>RUSLE2 (voir fiche)</p> <p>Foster 2003 Ismail 2007 Kinnell 2010</p>	1	1	<p>Revised Universal Soil Loss Equation 2</p> <p>Érosion : USLE classique</p> <p>Redéposition :</p> $TC = k_t \times q_p \times \sin(\theta)$ $D = \frac{V_r}{q_p} \times (TC - g)$	Conceptuel	<ul style="list-style-type: none"> - Intensité des pluies - Type de sol - Land-use - Facteur P 	<p>Taux d'érosion moyen le long de la pente considérée</p> <p>Calcule un ratio d'enrichissement :</p> $\left(\frac{\text{surf. spéc. sédiments}}{\text{surf. spéc. sol érodé}} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> - Tient compte de la redéposition - À chaque étape, le modèle réévalue les implications de la redéposition sur le flux de sédiments - Facile à utiliser - Intégrable à un GIS 	<ul style="list-style-type: none"> - Facteurs R,K,L,C,P sont différents que ceux utilisés dans USLE car le modèle fonctionne sur base journalière. Voir Ismail 2007 pour détails sur les calculs - Retourne une carte sur l'érosion moyenne annuelle mais n'indique pas vraiment les zones responsables des inondations boueuses. - Considère que tous les sédiments ont la même propension à être transportés (pas de distinction en fonction de leur taille). - Formes de pentes simplifiées - Uniquement érosion diffuse et en rigoles considérées - Manière d'appliquer la capacité de transport de sédiment est controversée - Le runoff est utilisé pour la redéposition mais pas pour l'érosion
<p>SWAT</p> <p>De Vente 2013</p>	1	1	<p>Soil Water Assessment Tool</p> <p>Le BV est séparé en « unité de réponse hydrologique » (HRU) Utilisation de MUSLE pour calculer l'érosion Échelle spatiale : BV Pas « event-based »</p>	Physique Conceptuel	De l'ordre de 25 paramètres	<ul style="list-style-type: none"> - Érosion de surface à chaque HRU - Sediment Yield - Runoff - Taux des pics 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de MUSLE - Redéposition considérée à l'aide de la vitesse de sédimentation 	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs - Redéposition considérée uniquement dans les chenaux, tous les sédiments érodés dans les HRU sont considérés comme totalement acheminés vers la rivière
<p>WATEM/SEDEM (voir fiche)</p> <p>Van Oost 2000 Van Rompaey 2001 Verstraeten 2006 De Vente 2008</p>	1	2	$E = R \times K \times LS_{2D} \times C \times P$ $T_c = k_{TC} \times E_{PR}$ $= k_{TC} \times R \times K \times (LS - a \times S_{IR})$ <p>Modèle spatialement distribué Échelle spatiale : BV Résultat annuel → pas « event-based »</p>	Empirique Conceptuel	<ul style="list-style-type: none"> - Raster parcellaire - MNT - Facteur R - Facteur K - Facteur LS - Facteur C - Facteur P - Coef. de transport de labour - Bulk density - k_{TC} 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Taux d'érosion moyen annuel 2) Capacité de transport 3) Sediment routing <p>Final : Raster avec érosion ou redéposition à chaque pixel</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Considère la redéposition - Utilise un facteur pente à 2D 	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs - Résultats dépendants de la taille du bassin étudié - Facteur k_{TC} à calibrer au césium radioactif dès qu'on change de contexte (solution = valider avec autre coefficient en gardant le même ratio arable/autres) - Ne considère pas les phénomènes de redéposition ou d'érosion dans les rivières mêmes → ce qu'on calcule = ce qui arrive tout le long de la rivière
<p>ABAG-flux (voir fiche)</p> <p>Voik 2010 Moller 2008</p>	1	4	$CI = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times A_{C_i})}{n \times 10}$ <p>Échelle spatiale : BV, fermes, champs, formation géologique ou partie de pente</p>	Empirique	<ul style="list-style-type: none"> - MNT - Facteur R - Facteur K - Facteur LS - Facteur C - Facteur P - MBI (Moller 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zones connectées aux rivières - Zones de transfert - Hotspots - Quantités potentielles de sol apportées 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse relative des résultats USLE → permet de nous séparer des valeurs absolues souvent biaisées - Regroupement et classement des résultats USLE (<i>k means cluster analysis</i>) - Considère la redéposition - Peut s'appliquer à des champs, fermes, BV, entités géomorphologiques ou parties de pente 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertitudes de la méthode USLE - Pas de validation

<p>SEAGIS</p>	1	5	<p>Calcule les « sediment yields » (SY) en se basant sur des cartes d'érosion (RUSLE), d'un « delivery index » (DI) et d'un facteur de calibration par rapport à la taille du BV considéré. Les SDR sont déterminés en fixant des seuils aux DI de telle sorte qu'au-delà du seuil max. aucune redéposition au en deçà du seuil min tout se redépose. Échelle spatiale : BV Échelle temporelle : annuelle</p>	Conceptuel Empirique	<ul style="list-style-type: none"> - Paramètres USLE - Paramètre d'échelle BV - Paramètres de flux (via algorithme) 	<ul style="list-style-type: none"> - Érosion - Sediment Yield 		<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs - Redéposition considérée de manière simplifiée, à l'aide de valeur seuil
<p>USPED <i>GISER WP4-GxABT_UCL Mitasova 1996</i></p>	1	6	<p>Unit Stream Power Erosion and Deposition Basé sur la théorie de la puissance de flux unitaire Échelle temporelle continue + « event-based » Échelle spatiale : BV</p>	Physique	<ul style="list-style-type: none"> - Facteur R - Pluviographe - Un événement de pluie - Quantité de ruissellement 	<ul style="list-style-type: none"> - Érosion - Redéposition 	<ul style="list-style-type: none"> - Considère la redéposition - « Event-based » + échelle temporelle continue 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté à obtenir des coefficients de transportabilité - Solution = Correspondance entre USPED et USLE → Tous les défauts de USLE...
<p>IC/FIC (voir fiche) <i>Borselli 2008 Cavalli 2013 Sougnéz 2011 Jamshidi 2014 Vigiak 2012 Leombruni 2009</i></p>	2	4	$IC_k = \log_{10} \frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}}$ $= \log_{10} \frac{\bar{W}_k \bar{S}_k \sqrt{A_k}}{\sum_{i=k,n,k} \frac{d_i}{\bar{W}_i S_i}}$ $FIC = \frac{S_u + S_d}{2}$	Empirique	<p>IC :</p> <ul style="list-style-type: none"> - MNT (facteur d, A, S) - Facteur W : dépend de sa définition (info topographique ou land-use) <p>FIC : Caractérisation de hotspots pour validation</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Indice de connectivité (IC) - Possibilité de retrouver SDR, SSL,... (Jamshidi 2014, Sougnéz 2011, Vigiak 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de faire varier les facteurs W (définition) et S (seuils) de telle sorte à calibrer au mieux notre modèle - Possibilité de calculer un CPS, SDR et SSL à partir des IC calculés à chaque pixel (Sougnéz 2011, Jamshidi 2014 respectivement) - Considère indirectement la redéposition 	<ul style="list-style-type: none"> - Le modèle semble être construit de toute pièce, et l'indice de connectivité n'a pas vraiment de signification physique
<p>CORINE <i>de Vente 2005</i></p>	3	0	<p>Voir tableau de classification des facteurs dans de Vente 2005</p>	Semi-quantitatif (scores)	<p>4 facteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Érodibilité du sol - Érosivité de la pluie - Topographie - Vegetation cover 	<ul style="list-style-type: none"> - Carte de risque d'érosion - Indice calculé par multiplication des trois premiers facteurs, puis application du dernier 		<ul style="list-style-type: none"> - Modèle assez simpliste - Sur-généralisation - Ne considère pas la redéposition
<p>EHU <i>De Vente 2005</i></p>	3	0	<p>Erosion Hazard Unit Se base sur la méthodologie du modèle SMELSA, une alternative à USLE</p>	Semi-quantitatif (scores)	<ul style="list-style-type: none"> - I_b : Indice de danger d'érosion (facteur érodibilité sol et érosivité pluie) - C : Land Use - X : Pente et longueur de pente 	<p>Carte avec indice final (multiplication des scores) à chaque pixel Indice à interpréter de manière relative (>< SMELSA qui nous donne directement un résultat en t/km²).</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Se focalise sur l'érosion diffuse & en rigoles, mais pas sur les ravines, les berges, ni sur le transport des sédiments. Il ne peut pas non plus estimer les effets « off-site ». - Ne considère pas la redéposition
<p>FKSM <i>De Vente 2005</i></p>	3	0	<p>Fleming & Kadimi Scoring Model</p>	Semi-quantitatif (scores)	<p>5 facteurs (notés de 1 à 5) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pente - Érosivité de la pluie (ratio Fournier) - Érodibilité du sol (texture) - Type de Land Cover - Temps depuis la dernière perturbation du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - SSY via multiplication des 5 facteurs et corrélé via une « design curve » 	<ul style="list-style-type: none"> - Les 5 facteurs sont pondérés en fonction de leur part de responsabilité dans l'érosion du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne considère pas la redéposition
<p>FSM <i>De Vente 2013 De Vente 2008</i></p>	3	0	<p>Factorial Scoring Model Voir De Vente 2013 Lumped / non-spatialement distribué (>< SPADS)</p>	Semi-quantitatif (scores)	<p>6 facteurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Topographie - Lithologie - Vegetation cover - Ravines - Landslides - Forme du bassin 	<ul style="list-style-type: none"> - Attribution d'une note de 1 à 3 pour chaque facteur et multiplication pour obtenir l'index - Index lié au SY via régression - Comme PSAC sauf qu'on multiplie ici 	<ul style="list-style-type: none"> - Tient compte de l'érosion diffuse, en rigoles, en ravines, chenaux et glissements de terrain - Nécessite peu de temps et de données pour des résultats assez précis et fiables 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle assez subjectif car scores déterminés par des experts, principalement par des visites de terrain - Donne une prédiction du SY mais pas des surfaces sources de sédiments

Gavrilovic <i>de Vente 2005</i> (+ nombreuses applications citées dedans)	3	0	Le plus quantitatif des modèles semi-quantitatif, car fait intervenir des inputs autres que des facteurs cotés. Équations et tableau de classification dans de <i>Vente 2005</i>	Semi-quantitatif (scores)	3 facteurs scores : <ul style="list-style-type: none"> - Occupation du sol - Résistance du sol - Type et étendue de l'érosion Autres variables : quantitatives !	<ul style="list-style-type: none"> - Sediment Yield - Sediment Delivery Ratio 	<ul style="list-style-type: none"> - Approche à la fois semi-quantitative et quantitative - GIS compatible 	<ul style="list-style-type: none"> - Calibration des paramètres semble être à refaire à chaque nouveau contexte - Initialement développé pour des bassins torrentiels yougoslaves - Ne considère pas la redéposition
PSIAC <i>De Vente 2013</i> <i>De Vente 2008</i>	3	0	Pacific Southwest Inter-Agency Committee Lumped / non-spatialement distribué	Semi-quantitatif (scores)	9 inputs : Topographie, climat, runoff, lithologie, sol, végétation, land use, érosion en amont, érosion canalisée	<ul style="list-style-type: none"> - « PSIAC Index » (somme des scores) - Index lié au SY via régression - Comme FSM sauf que l'on somme ici 	<ul style="list-style-type: none"> - Tient compte de l'érosion diffuse, en rigoles, en ravines, chenaux et glissements de terrain - Nécessite peu de temps et de données pour des résultats assez précis et fiables 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle assez subjectif car scores déterminés par des experts, principalement par des visites de terrain - Donne une prédiction du SY mais pas des surfaces sources de sédiments → SPADS est mieux
VSD <i>de Vente 2005</i>	3	0	Vegetation Surface material-Drainage density model Relation entre SSY et un indice $VSD = (1 - V_c) + S_c + D_d$	Semi-quantitatif (scores)	3 facteurs : <ul style="list-style-type: none"> - Couverture végétale - Lithologie - Densité de drainage 	<ul style="list-style-type: none"> - VSD Index (somme des scores) - SSY (via corrélation au VSD par facteur = 0.93) 		<ul style="list-style-type: none"> - Pas de validation pour tester les performances du modèle...
WSM <i>De Vente 2005</i>	3	0	Wallingford Scoring Model $SSY = 0.0194 \times A^{-0.2} \times R^{0.7} \times S^{0.3} \times SE^{1.2} \times S^{0.7} \times V^{0.5}$	Semi-quantitatif (scores)	4 facteurs « intensité érosion » : <ul style="list-style-type: none"> - Signes d'érosion (qualitatif) - Type de sol (qualitatif) - Conditions de végétation (qualitatif) - Pente du bassin 2 facteurs « effets de relargage de sédiments » : <ul style="list-style-type: none"> - Surface du bassin - Pluie annuelle moyenne 	<ul style="list-style-type: none"> - SSY [t/(km².an)] via régression multiple 		<ul style="list-style-type: none"> - Les facteurs qualitatifs nécessitent une étude de terrain
CSSM (voir fiche) <i>De Vente 2005</i> <i>Coleman & Scatena 1986</i>	3	4	Coleman & Scatena Scoring Model Développé pour situer les zones sources de sédiments. Séparation des zones en 4 types : Agricoles, Construction, Mines gravier/sable, et cours d'eau. Voir tableau de Vente 2005 pour classification	Semi-quantitatif (scores)	4 facteurs « on-site » : <ul style="list-style-type: none"> - Land Use - Ground Cover - Topographie - Érodibilité du sol 2 facteurs « off-site » : <ul style="list-style-type: none"> - Transport des sédiments - Connectivité 	<ul style="list-style-type: none"> - Score cumulé (somme) pour chaque zone 	<ul style="list-style-type: none"> - Identifie les principales zones sources contribuant au sediment yield. Permet de déterminer quel est le principal processus responsable du détachement et du transport des sédiments - Tient compte des zones de construction et mines, et autres perturbations humaines 	<ul style="list-style-type: none"> - Redéposition estimée seulement indirectement à l'aide des facteurs « off-sites »
SPADS (voir fiche) <i>De Vente 2013</i> <i>De Vente 2008</i>	3	4	Spatially Distributed Scoring model Index $Index = V \times T \times L \times R \times G \times iD$ Spatialement distribué	Semi-quantitatif (scores)	6 facteurs : <ul style="list-style-type: none"> - V : Vegetation cover - T : Topographie - L : Lithologie - R : Intensité pluie - G : Gully (Ravines) - iD : Inverse de la distance à un cours d'eau [m⁻¹] 	<ul style="list-style-type: none"> - Index pour chaque pixel 	<ul style="list-style-type: none"> - La carte des indices retournés représente les zones sources de sédiments - Tient compte de l'érosion diffuse, en rigoles, ravines, chenaux et glissements de terrain - Comparé à FSM et PSIAC, scores obtenus de manière + objective via des données quantitatives 	<ul style="list-style-type: none"> - Le modèle ne considère pas vraiment la redéposition dans le paysage, et n'en tient que grossièrement compte via le facteur iD - Les zones proches des rivières sont d'office mises en évidence à cause du facteur iD
SSY Index <i>De Vente 2013</i> <i>Delmas 2009</i>	3	5	Voir de Vente et Delmas Modèle calibré sur 29 grandes rivières européennes	Semi-quantitatif (scores)	<ul style="list-style-type: none"> - Topographie - Land use - Paramètre de sol - Pente - Carte lithologiques - Carte des rivières 	4 indicateurs : <ul style="list-style-type: none"> - Mouvements de masse - Érosion de flanc - Puits (dépôt) - Densité de drainage 		<ul style="list-style-type: none"> - Ne considère la redéposition qu'en désignant les surfaces avec une pente <2 %.

<p>STREAM (voir fiche) <i>Cerdan 2002</i></p>	3	5	<p>Classification en fonction de la rugosité, de la couverture végétale, de l'intensité de l'évènement pluvieux, et de l'état d'encroûtement du sol</p> <p>« Event-based »</p>	Semi-quantitatif (scores)	<ul style="list-style-type: none"> - Classe de rugosité - Classe de couverture végétale - Classe d'intensité pluvieuse - Classe d'encroûtement du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration en sédiments (gamme) - Runoff - Redéposition 	<ul style="list-style-type: none"> - GIS compatible - Redéposition à l'échelle du BV est prise en compte 	<ul style="list-style-type: none"> - Redéposition le long du chemin d'écoulement (runoff tailing) n'est pas prise en compte - Déposition basée sur des seuils déterminés expérimentalement, de manière empirique
<p>ANSWERS <i>de Roo 1996</i> <i>Merritt 2003 (tableau)</i> Explication détaillée : <i>Beasley 1980</i></p>	4	?	<p>Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation</p> <p>Modèle fait pour simuler les comportements hydrologiques des bassins principalement caractérisés par l'agriculture</p> <p>Échelle spatiale : petit BV</p>	Physique	Beaucoup	<ul style="list-style-type: none"> - Sédiments - Nutriments 	<ul style="list-style-type: none"> - Pendant, et directement après un évènement pluvieux - GIS compatible - Considère les pertes par transmissions de runoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Érosion basée sur le modèle USLE - L'équation d'infiltration utilisée (Holtan) est empirique - Beaucoup d'inputs
<p>KINEROS(2) <i>de Roo 1996</i> <i>GISER – Modélisations 2015</i> <i>Saavedra 2005</i></p>	4	?	<p>KINematic EROSION Simulation model</p> <p>Utilise le modèle d'infiltration Smith/Parlange et l'approximation « kinematic wave » pour suivre le flux. Le bassin est représenté par une série de plans et de chenaux.</p> <p>« Event-based »</p>	Physique	<p>Paramètre hydrologique et de végétation nombreux et pas toujours physiquement mesurables : précipitation, microtopographie et topographie, propriétés hydrauliques et mécanique du sol (conductivité hydraulique du sol, quantité de pluie déjà absorbée par le sol, vitesse de capillarité, contenu du sol en eau, valeur initiale du contenu en eau, fraction charge caillouteuse à la surface, Manning, rayon hydraulique, pente, périmètre mouillé, largeur du chenal en amont)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ruissellement - Érosion - Taux des pics - Sédiments 	<ul style="list-style-type: none"> - L'équation physique d'infiltration est la force de ce modèle - GIS compatible : via « AGWA » 	<ul style="list-style-type: none"> - La représentation en plans/chenaux limite la taille du bassin pouvant être considéré car ne peut que contenir que 60 éléments. Solution existe mais temps de calcul explose. - Inputs contraignants et nombreux
<p>PESERA <i>De Vente 2013</i> <i>De Vente 2008</i></p>	4	0	<p>$E = k \times \Delta \times \Omega$</p> <p>Spatialement distribué Pas « event-based »</p>	Physique	<p>Très nombreux (128)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sol (érodibilité, occupation du sol, végétation,...) - Topographie - Climat,... 	<ul style="list-style-type: none"> - Taux d'érosion du sol moyen à long-terme 		<ul style="list-style-type: none"> - Modèle physique très gourmand en input - Ne tient pas compte du cheminement des sédiments jusqu'à la rivière donc ne peut pas bien prédire le SY d'un BV (les ravines permanentes, l'érosion dans les chenaux, les procédés impliqués dans la distribution des chenaux et le cheminement des chenaux sont pas considérés) - Ne considère pas la redéposition
<p>WEPP <i>Amore 2004</i> Explication détaillée : <i>Flanagan, Nearing 2000</i></p>	4	1	<p>Water Erosion Prediction Project</p> <p>Le modèle utilise une équation de continuité en régime permanent pour estimer le détachement ou la redéposition nette de sédiments. Il distingue l'érosion en rigoles et entre les rigoles.</p> <p>Échelle spatiale : mauvais pour grands BV « Event-based »</p>	Physique	Très nombreux (> 200 !!)	<ul style="list-style-type: none"> - Sediment yield - Estime l'érosion ou la redéposition dans toute la zone étudiée 	<ul style="list-style-type: none"> - À la base conçu pour étendre les capacités de prédictions de USLE sur une plus large variété de paysages et paramètres - Résultats indépendants de la taille du bassin étudié - Peut prédire sur des pentes aux formes complexes 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexité élevée - Accumulation d'erreurs / incertitudes - Difficulté d'utilisation - Surestime les faibles pertes annuelles de sol et sous-estime les fortes - Gourmand en inputs
<p>EPIC <i>Saavedra 2005</i></p>	4	3	<p>Erosion/Productivity Impact Calculator</p> <p>Échelle spatiale : flanc de montagne, BV</p> <p>Échelle temporelle : continue</p>	Physique	Nombreux	<ul style="list-style-type: none"> - Érosion 		<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs

<p>EROSION-3D</p> <p><i>GISER – Modélisations 2015 Saavedra 2005 Schmidt 1999</i></p>	4	3	<p>Ce modèle opère en se basant sur les quelques équations physiques caractérisant le détachement des sédiments, leur transport et leur redéposition. Utilisation de l'équation d'infiltration de <i>Green & Ampt</i> + modification empirique pour être plus réaliste</p> <p>Échelle spatiale : BV « Event-based »</p>	Physique	<ul style="list-style-type: none"> - Intensité de la pluie - Durée de la pluie - MNT - Texture du sol - Bulk density - % MO - Humidité initiale du sol - Rugosité (Manning) - Résistance à l'érosion - Couverture de la canopée 	<p>À la sortie d'une cellule :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Runoff - Sediment yield - Taille des sédiments <p>À chaque pixel :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Érosion / redéposition - Érosion nette 	<ul style="list-style-type: none"> - Considère la redéposition 	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs
<p>EUROSEM (voir fiche)</p> <p><i>Morgan 1998</i></p>	4	3	$\omega = 10 u s$ $TC = c (\omega - \omega_{cr})^n \text{ (rill)}$ $TC = \frac{b}{\rho_s q} [(\Omega - \Omega_c)^{\frac{0.7}{n}} - 1]^5$ <p>Échelle spatiale : champs ou petit bassin versant Non spatialement distribué « Event-based »</p>	Physique	Très nombreux	<ul style="list-style-type: none"> - Runoff total - Érosion totale - Graphes sédiments 	<ul style="list-style-type: none"> - Tient compte d'un grand nombre de paramètres influençant l'érosion 	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs - GIS incompatible (>< LISEM)
<p>GUEST</p> <p><i>Saavedra 2005 Merritt 2003</i></p>	4	3	<p>Griffith University Erosion System Template</p> <p>Échelle temporelle : continue</p>	Physique	Nombreux	<ul style="list-style-type: none"> - Runoff - Concentration en sédiments 	<ul style="list-style-type: none"> - Redéposition considérée 	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs
<p>HPSF</p> <p><i>Saavedra 2005 Merritt 2003</i></p>	4	3	<p>Hydrologic Simulation Program, Fortran</p> <p>Sépare le BV en sous unités. 3 modules : Sol imperméable, sol perméable, et rivières</p> <p>Échelle spatiale : BV Échelle temporelle : continue</p>	Physique Conceptuel	Très nombreux	<ul style="list-style-type: none"> - Runoff - Flow rate - Charge en sédiments 		<ul style="list-style-type: none"> - Modèle centré initialement sur les nutriments/polluants
<p>LASCAM</p> <p><i>GISER 2015 – Modélisations Viney 2000</i></p>	4	3	<p>Modèle considérant des sous-bassins entièrement, et additionnant les effets de chacun pour obtenir un résultat global de BV → conceptuel</p> <p>Érosion et redéposition caractérisées à l'aide d'équations physiques</p> <p>Échelle spatiale : BV</p>	Conceptuel Physique	<ul style="list-style-type: none"> - Précipitations journalières - Évaporation - Usage du sol - Topographie - Mesures de courant 	<ul style="list-style-type: none"> - Ruissellement - Flux de sel 		<ul style="list-style-type: none"> - Modèle principalement conçu pour caractériser les transports de nutriments, et non de sédiments
<p>LISEM</p> <p><i>de Roo 1999 De Roo 1996 de Vente 2013 Merritt 2003 (tableau)</i></p>	4	3	<p>Ressemble à EUROSEM mais sous forme de raster</p> <p>« Event-based »</p> <p>Échelle spatiale : petits BV</p>	Physique	Très détaillés + haute résolution	<ul style="list-style-type: none"> - Interception de la pluie (infiltration) - Splash detachment - Détachement sédiment par flux, leur transport et leur dépôt via « unit stream power » 	<ul style="list-style-type: none"> - Runoff - Sediment Yield 	<ul style="list-style-type: none"> - GIS compatible - Considère la redéposition
<p>MIKE-11</p> <p><i>Saavedra 2005</i></p>	4	3	<p>Programme informatique aux nombreuses applications</p> <p>Échelle temporelle : continue Échelle spatiale : BV</p>	Physique	Très nombreux	<ul style="list-style-type: none"> - Sediment Yield - Runoff 		<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs
<p>MMMFM</p> <p><i>GISER – Modélisations 2015 Morgan 2008</i></p>	4	3	<p>Modified Morgan–Morgan–Finney model</p> <p>Pas « event-based »</p>	Conceptuel Empirique	<ul style="list-style-type: none"> - Quantité de pluie - Durée de la pluie - Intensité du pic - Durée du pic - Quantité de ruissellement - Conductivité hydraulique - MNT 	<ul style="list-style-type: none"> - Ruissellement - Érosion 	<ul style="list-style-type: none"> - Considère de nombreux paramètres, notamment liés à l'occupation du sol - Redéposition considérée - Utilise le runoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Besoin d'un nombre considérable d'inputs

<p>PERFECT</p> <p><i>Saavedra 2005</i> <i>Merritt 2003</i></p>	4	3	<p>Productivity, Erosion and Runoff, Functions to Evaluate Conservation Techniques</p> <p>Construit afin de compléter les manques du modèle CREAMS (cultures en jachère, labour,...) Échelle temporelle : journalier Échelle spatiale : parcellaire</p>	Physique	Très nombreux	<ul style="list-style-type: none"> - Bilan hydrique - Érosion - Runoff - Croissance des cultures 	Considère les changements d'occupation du sol et de type de cultures (contrairement à CREAMS)	
<p>SHETRAN</p> <p><i>Saavedra 2005</i> <i>GISER – Modélisations 2015</i> Description détaillée : <i>Ewen 2000</i> <i>+ Wicks and Bathurst 1996</i> (équations)</p>	4	3	<p>Système hydrologique Européen – Transport</p> <p>Équations d'advection-dispersion (2D) pour caractériser l'érosion et la dispersion Échelle spatiale : BV « Event-based »</p>	Physique	+ de 30 paramètres (flux d'eau, transport de sédiments et transport de solutés)	<ul style="list-style-type: none"> - Runoff - Taux des pics - Sediment Yield - Sédiments 		- Beaucoup d'inputs
<p>TOPOG</p> <p><i>Saavedra 2005</i></p>	4	3	<p>Calcule l'érosion et le transport des sédiments via la capacité de transport (équation de TC le long d'un lit meuble). 2 modules de pluie-débit : état constant et dynamique Échelle spatiale : BV Échelle temporelle : journalier MAIS peut s'adapter pour calculer les débits lors d'événements pluvieux intenses</p>	Physique	<ul style="list-style-type: none"> - Topographie - Climat - Végétation - Sols 	<ul style="list-style-type: none"> - Danger d'érosion - Runoff 		- Beaucoup d'inputs
<p>VFSMod</p> <p><i>GISER 2015 – Modélisations</i></p>	4	3	<p>Vegetative Filter Strip Modeling System</p>	Physique	Hyétogramme des pluies, K_{sat} du sol, θ_{sat} du sol, $\theta_{initial}$, Succion du sol au front d'infiltration, Stockage de surface du sol, Hydrogramme, Dimensions de la bande, Pente, Coefficient de Manning, Caractéristiques sédiments, Espacement entre les tiges, Porosité du dépôt en sédiments, Concentration en sédiments, % de sédiments fins, Nb de nœuds pour le domaine, Nb de courants pour la résolution numérique et le temps total de simulation	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité de rétention du ruissellement et des sédiments 		- Conçu pour caractériser les bandes enherbées
<p>CAESAR</p> <p><i>GISER – modélisations 2015</i></p>	4	4	<p>Débit total calculé par une version modifiée de TOPMODEL Écoulements caractérisés par un algorithme « balayage ». Système de « couches actives » « Event-based »</p>	Physique	<ul style="list-style-type: none"> - MNT - Pluies horaires sur la période considérée - Caractéristiques granulométriques du sol. 	<ul style="list-style-type: none"> - Distribution des altitudes et des sédiments - Débits d'eau et de sédiments 	- Gestion de l'évolution de la topographie	- Ne considère pas les mouvements de sol lié au labour
<p>CREAMS</p> <p><i>de Roo 1996</i> <i>Merritt 2003 (tableau)</i> Explication détaillée : <i>Knisel 1980</i></p>	4	4	<p>Chemical Runoff & Erosion from Agricultural Management Systems</p> <p>Modèle créé pour l'évaluation de la qualité de l'eau de pratiques agricoles diverses Échelle spatiale : parcellaire → pas fait pour les BV Pas « event-based »</p>	Physique	Nombreux	<ul style="list-style-type: none"> - Runoff - Sediment Yield 		<ul style="list-style-type: none"> - Capacités limitées pour le « sediment routing » - Beaucoup d'inputs

<p>LandSoil</p> <p><i>GISER – Modélisations 2015</i></p> <p>Explication détaillée : <i>Ciampalini 2012</i></p>	4	4	<p>Basé sur le modèle STREAM et sur le modèle d'érosion-labour WATEM/SEDEM</p> <p>Zone étudiée = système ouvert</p> <p>Équations basées sur l'équilibre infiltration/ruissellement</p> <p>Spatialement distribué « Event-based »</p>	Physique	<ul style="list-style-type: none"> - MNT - Classe de couverture végétale - Classe de rugosité (parallèle et perpendiculaire au sens du travail du sol) - Occupation du sol - Pluie (intensité et durée) - Azimut du sens du travail du sol (angle en °) - Stade de fermeture de la surface du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Accumulation du ruissellement - Nouvel MNT 	<ul style="list-style-type: none"> - Considère l'érosion rigole, inter-rigole, et de labour - Évolution de la topographie de la zone étudiée est prise en compte 	<p>Hypothèse : Caractéristiques de la surface du sol sont les facteurs majeurs contrôlant les processus de ruissellement de l'eau et de redistribution/érosion des sols</p>
<p>ART – BQART</p> <p><i>De Vente 2013</i> <i>Syvitski & Milliman 2007</i></p>	5	0	<p>Voir <i>De Vente 2013</i></p> <p>Pas spatialement distribué (« lumped » model)</p> <p>Visée à long terme</p>	Régression non-linéaire	<ul style="list-style-type: none"> - Surface (A) - Relief à grande échelle (R) - Température moyenne annuelle (Tm) - Flux rivière (Q) - Interventions humaines (B) 	<ul style="list-style-type: none"> - Charge en sédiments à long-terme 		<ul style="list-style-type: none"> - Output hors contexte - Très général - Ne tient pas compte de l'occupation du sol ni des précipitations → Ne prend pas en compte certains facteurs importants - Ne donne aucune information quant aux processus dans le bassin
<p>Pelletier</p> <p><i>De Vente 2013</i></p>	5	0	<p>Voir <i>De Vente 2013</i></p> <p>Spatialement distribué</p> <p>Pas « event-based »</p>	Régression non-linéaire	<p>29 inputs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Topographie - % Argile, limon, sable et gravier - Pluie moyenne annuelle - LAI moyen annuel 	<ul style="list-style-type: none"> - « Suspended » SY 	<p>Le modèle distingue le détachement des sédiments sur les versants et vallées de « faibles ordres », du transport des sédiments dans les chenaux alluviaux de « plus grands ordres »</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Assez général (pour le monde entier) - N'a pas été validé - Que pour connaître le « suspended » SY
<p>WBMsed</p> <p><i>De Vente 2013</i> <i>Cohen 2013</i></p>	5	0	<p>= modèle BQART, mais spatialement distribué (avec « WMBplus » qui est un modèle spatialement distribué de bilan d'eau global journalier)</p>	Régression non-linéaire	<ul style="list-style-type: none"> - Voir BQART 	<ul style="list-style-type: none"> - Voir BQART 		<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne en continu et montre de grosses sous- ou surestimations lorsqu'utilisé dans le cas d'un événement pluvieux intense
<p>IHACRES-WP</p> <p><i>Saavedra 2005</i> <i>Merritt 2003</i></p>	6	0	<p>Modèle combinant à la fois le modèle IHACRES (pluie-runoff) et le modèle STARS (charge en sédiments rivière)</p> <p>Échelle spatiale : BV</p> <p>Échelle temporelle : continue</p>	Empirique Conceptuel	<p>Peu nombreux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Séries temporelles de débit cours d'eau, de précipitations, T° et ET 	<ul style="list-style-type: none"> - Runoff - Sédiments 		<ul style="list-style-type: none"> - Modèle consacré à la caractérisation des flux dans les chenaux uniquement
<p>IQQM</p> <p><i>Saavedra 2005</i> <i>Merritt 2003</i></p>	6	0	<p>Integrated Water Quantity and Quality Model</p> <p>Échelle temporelle : continue</p> <p>Échelle spatiale : BV</p>	Conceptuel Empirique Physique	<p>Nombre modéré</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sédiments - Charge en sédiments 		<ul style="list-style-type: none"> - Modèle à la base très hydrologique (pas pour sédiments)
<p>SPL</p>	6	0	<p>Stream Power Law</p> $E = K_f \times Q^m \times S^n$ <p>Échelle temporelle : annuelle</p>	Conceptuel Empirique	<ul style="list-style-type: none"> - Aire contributive - Précipitations annuelles - Paramètres de calibration - Coefficient pour lithologie, sol et climat 	<ul style="list-style-type: none"> - Érosion fluviale - Incision de la rivière 		<ul style="list-style-type: none"> - Ne considère que l'érosion dans les chenaux
<p>Thornes</p> <p><i>GISER – Modélisations 2015</i> <i>Diodato 2006</i> <i>ANH 2009</i></p>	6	0	$E = k \times Q^a \times s^d \times e^{-i \cdot v}$ <p>Revised :</p> $ANE_{ADT_j} = k \times \frac{R_j^m}{(Med_w(P))^c} \times e^{-b \cdot WVC_j}$ <p>Pas « event-based »</p>	Conceptuel Empirique	<ul style="list-style-type: none"> - Quantité de pluie journalière - Durée de la pluie - Intensité du pic - Durée du pic - Quantité de ruissellement - Taux de ruissellement maximal 	<ul style="list-style-type: none"> - Ruissellement - Érosion 	<ul style="list-style-type: none"> - Considère le runoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne considère pas la redépôtion

5.6. Bibliographie

Une base de données bibliographique de type « Zotero » a été créée, et a été ajoutée en annexe de ce rapport.

- Alder, S., Prasuhn, V., Liniger, H., Herweg, K., Hurni, H., Candinas, A., Gujer, H.U., 2015. A high-resolution map of direct and indirect connectivity of erosion risk areas to surface waters in Switzerland - A risk assessment tool for planning and policy-making. *Land Use Policy* 48, 236–249.
- Amore, E., Modica, C., Nearing, M.A., Santoro, V.C., 2004. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology* 293, 100–114.
- ANH, L.T., 2009. Regional Scale Soil Erosion Modeling for Observation Planning Using Remote Sensing and GIS Techniques - A Case Study in The Centre of Himalayan Ranges. 7th FIG Regional Conference - Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., 1980. ANSWERS: A model for watershed planning.
- Biélders, C., n.d. Application of the USLE equation to non-uniform slopes.
- Biélders, C., Degré, A., 2011. Convention de recherche d'intérêt général : Gestion Intégrée Sol Érosion Ruissellement.
- Boardman, J., Shephard, M.L., Walker, E., Foster, I.D.L., 2009. Soil erosion and risk-assessment for on- and off-farm impacts: A test case using the Midhurst area, West Sussex, UK. *Journal of Environmental Management* 90, 2578–2588.
- Borselli, L., Cassi, P., Torri, D., 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA* 75, 268–277.
- Bosch, D., Theurer, F., Bingner, R., Felton, G., Chaubey, I., 1998. Evaluation of the AnnAGNPS water quality model. Editors: John E. Parsons, Daniel L. Thomas, Rodney L. Huffman 45.
- Cârdeș, P., 2010. The dimensional analysis of the USLE-MUSLE soil erosion model. National Institute of Research-Development for Machines and Installations Designed to Agriculture and Food Industry (INMA) 249–253.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* 188, 31–41.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Saby, N., 2002. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes* 16, 3215–3226.
- Ciampalini, R., Follain, S., Le Bissonnais, Y., 2012. LandSoil: A model for analysing the impact of erosion on agricultural landscape evolution. *Geomorphology* 175–176, 25–37.
- Cohen, S., Kettner, A.J., Syvitski, J.P.M., Fekete, B.M., 2013. WBMsed, a distributed global-scale riverine sediment flux model: Model description and validation. *Computers & Geosciences, Modeling for Environmental Change* 53, 80–93.
- Coleman, D.J., Scatena, F.N., 1986. Identification and evaluation of sediment sources. Drainage basin sediment delivery. Proc. symposium, Albuquerque, 1986 3–18.
- CORINE, 1992. Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southern Regions of the European Community (No. EUR 13233). Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Delmas, M., Cerdan, O., Mouchel, J.-M., Garcin, M., 2009. A method for developing a large-scale sediment yield index for European river basins. *Journal of Soils and Sediments* 9, 613–626.
- De Roo, A.P.J., Jetten, V.G., 1999. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *CATENA* 37, 477–493.
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Ritsema, C.J., 1996. Lisem: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrological Processes* 10, 1107–1117.

- Desmet, P.J.J., Govers, G., 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51, 427–433.
- de Vente, J., Poesen, J., 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews* 71, 95–125.
- De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., Arabkhedri, M., Boix-Fayos, C., 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? *Earth-Science Reviews* 127, 16–29.
- de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., Govers, G., 2008. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change* 60, 393–415.
- Diodato, N., 2006. Modelling net erosion responses to enviroclimatic changes recorded upon multiseccular timescales. *Geomorphology* 80, 164–177.
- Ewen, J., Parkin, G., O'Connell, P.E., 2000. SHETRAN: Distributed river basin flow and transport modeling system. *Journal of Hydrologic Engineering* 5, 250–258.
- Flacke, W., Auerswald, K., Neufang, L., 1990. Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *CATENA* 17, 383–397.
- Flanagan, D.C., Nearing, M.A., others, 2000. Sediment particle sorting on hillslope profiles in the WEPP model. *Transactions of the ASAE* 43, 573–583.
- Fleming, G., Kadhim, A. Al, 1982. Sediment modelling and data sources: a compromise in assessment. Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield. Proc. Exeter symposium, July 1982 251–259.
- Foster, G.R., Toy, T.E., Renard, K.G., 2003. Comparison of the USLE, RUSLE1.06c, and RUSLE2 for application to highly disturbed lands. USDA-ARS, K.G. Renard et al. (ed.) Proc. Interagency Conf. on Research in the Watersheds 154–160.
- GISER, 2015. Modélisation du dépôt de sédiments.
- Gisler, S., Liniger, H., Prasuhn, V., 2011. Carte à haute résolution du risque d'érosion au raster 2x2 m (CRE2). *Recherche Agronomique Suisse* 2 4, 148–155.
- Haregeweyn, N., Yohannes, F., 2003. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, western Hararghe, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 99, 201–212.
- Ismail, J., Ravichandran, S., 2007. RUSLE2 Model Application for Soil Erosion Assessment Using Remote Sensing and GIS. *Water Resour Manage* 22, 83–102.
- Jamshidi, R., Dragovich, D., Webb, A.A., 2014. Distributed empirical algorithms to estimate catchment scale sediment connectivity and yield in a subtropical region. *Hydrological Processes* 28, 2671–2684.
- Jinfa, L., Xiuhua, H., 2004. The relationship between sediment yield and catchment characteristics in the middle Yellow River basin of China. *IAHS PUBLICATION* 288, 212–219.
- Kinnell, P.I.A., 2010. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology* 385, 384–397.
- Kinnell, P.I.A., 2005. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. *Hydrol. Process.* 19, 851–854.
- Kinnell, P.I.A., 2001. Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. *Soil and Tillage Research* 58, 11–17.
- Kinnell, P.I.A., Risse, L.M., 1998. USLE-M: Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal* 62, 1667–1672.
- Knisel, W.G., others, 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report.
- Leombruni, A., Blois, L., Mancini, M., 2009. First Evaluation of Soil Erosion and Sediment Delivery in the High Part of the Tevere Watershed. *EJGE* 14.

- Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J., 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software* 18, 761–799.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L.R., 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems* 10, 629–641.
- Möller, M., Volk, M., Friedrich, K., Lymburner, L., 2008. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 419–430.
- Morgan, R.P.C., Duzant, J.H., 2008. Modified MMF (Morgan–Morgan–Finney) model for evaluating effects of crops and vegetation cover on soil erosion. *Earth Surf. Process. Landforms* 33, 90–106.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 527–544.
- Prasuhn, V., Liniger, H., Gisler, S., Herweg, K., Candinas, A., Clément, J.-P., 2013. A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as strategic policy support system. *Land Use Policy* 32, 281–291.
- Prosser, I.P., Young, B., Rustomji, P., Hughes, A., Moran, C., 2001. A model of river sediment budgets as an element of river health assessment. *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'2001)*, December 10–13.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., others, 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Department of Agriculture Washington, DC.
- Saavedra, C., 2005. Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition of the Andean region using geo-information techniques : a case study in Cochabamba, Bolivia.
- Sadeghi, S.H., Mizuyama, T., Ghaderi Vangah, B., 2007. Conformity of MUSLE estimates and erosion plot data for storm-wise sediment yield estimation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 18, 117–128.
- Sadeghi, S.H.R., Gholami, L., Darvishan, A.K., Saeidi, P., 2014. A review of the application of the MUSLE model worldwide. *Hydrological Sciences Journal* 59, 365–375.
- Schmidt, J., Werner, M. v, Michael, A., 1999. Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. *CATENA* 37, 449–456.
- Searle, R., 2005. Modelling of runoff, sediment and nutrient loads for the Maroochy river catchment using EMSS. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Technical Report 05/08.
- Sharpley, A.N., Williams, J.R., others, 1990. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture.
- Sougnéz, N., van Wesemael, B., Vanacker, V., 2011. Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *CATENA* 84, 1–11.
- Syvitski, J.P.M., Milliman, J.D., 2007. Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean. *Journal of Geology* 115, 1–19.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33, 309–319.
- USDA, 2008. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2. USDA-Agricultural Research Service Washington, D.C.
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P., 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15, 577–589.
- Van Rompaey, A.J.J., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., Poesen, J., 2001. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1221–1236.
- Verstraeten, G., 2006. Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. *Geomorphology* 81, 128–140.
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., Roberts, A.M., 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology* 138, 74–88.

- Vigiak, O., Malagó, A., Bouraui, F., Obreja, F., Poesen, J., Borselli, L., 2014. Including hillslope sediment connectivity in SWAT—the Siret Basin case study.
- Viney, N.R., Sivapalan, M., Deeley, D., 2000. A conceptual model of nutrient mobilisation and transport applicable at large catchment scales. *Journal of Hydrology* 240, 23–44.
- Volk, M., Möller, M., Wurbs, D., 2010. A pragmatic approach for soil erosion risk assessment within policy hierarchies. *Land Use Policy* 27, 997–1009.
- White, S., 2005. Sediment yield prediction and modelling. *Hydrol. Process.* 19, 3053–3057.
- Wicks, J.M., Bathurst, J.C., 1996. SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. *Journal of Hydrology* 175, 213–238.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. *Agriculture Handbooks (USA)*, No. 537 62 pp.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., Anderson, W.P., 1989. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of soil and water conservation* 44, 168–173.
- Zhang, Y., Degroote, J., Wolter, C., Sugumaran, R., 2009. Integration of modified universal soil loss equation (Musle) into a GIS framework to assess soil erosion risk. *Land Degradation and Development* 20, 84–91.

5.7. Annexes

5.7.1. Fiches modèles détaillées

Ci-dessous sont présentées quelques « fiches » reprenant les grands modèles rencontrés lors de cette étude. Ces fiches ont été rédigées dans le but de donner davantage d'information au lecteur sur les grands types de modèles existants.

✓ **RUSLE 2** (Revised Universal Soil Loss Equation 2)

Type de modèle : Empirique, Conceptuel

Inputs : Nombreux

Outputs : Taux d'érosion moyen à long terme le long de la pente considérée

<u>Variables</u> :	T_c	Capacité de transport de sédiments	[kg.(m.s) ⁻¹]
	k_t	Coefficient de transport, qui limite les contraintes de cisaillement à celles responsables de l'érosion et du transport des sédiments	[kg.m ⁻³]
	K_t	Transportabilité des sédiments	[kg.m ⁻³]
	ζ	Coef. pour l'effet de la résistance hydraulique sur la capacité de transport	[-]
	q_p	Débit de pointe (par unité de largeur)	[m ³ .(m.s) ⁻¹]
	θ	Angle de pente	[°]
	D	Taux de déposition	[kg.(m ² .s) ⁻¹]
	α_d	Coef. de déposition à calibrer	[-]
	V_f	Vitesse de sédimentation des sédiments	[m.s ⁻¹]
	g	Flux en sédiments	[kg.(m.s) ⁻¹]

RUSLE2 sépare les sédiments en 5 classes texturales. Ensuite, il traite les classes séparément, mais tient également compte des interactions entre elles. Le modèle calcule la redéposition, comment cette redéposition influence les caractéristiques du flux le long de la pente, pour ensuite recalculer la redéposition. Le modèle ajuste la composition en sédiments pour tenir compte de la déposition préférentielle des particules plus larges. Cependant, RUSLE2 considère toutes les tailles de sédiments comme également transportables (transportabilité des sédiments K_t unique), ce qui est questionnable.

Le coefficient k_t diminue ainsi lorsque la résistance hydraulique augmente (via couverture du sol, retard lié à la végétation ou rugosité de la surface). Ces effets sont intégrés dans le calcul du coefficient ζ.

Le modèle utilise des sous-facteurs pour intégrer l'occupation du sol : couverture par la canopée & hauteur de chute, rugosité du sol, charge en cailloux et débris, type de pente, production végétale annuelle, laps de temps depuis la dernière perturbation du sol (donc consolidation).

Pour calculer le ruissellement (pour la redéposition), RUSLE2 utilise la méthode « SCS Curve Number » sur base des précipitations durant 10 ans/24h.

Équations : Érosion : $E = S \sum_k (r_k k_k l_k c_k p_k)$ avec k l'indice du jour de l'année

Déposition : $T_C = k_t \times q_p \times \sin(\theta)$

$T_C = K_t \times \zeta \times q_p \times \sin(\theta)$ avec $q_p \times \sin(\theta)$ représentant les contraintes de cisaillement totales, et k_t un coefficient permettant de ne prendre en compte que la partie de ces contraintes responsables de l'érosion

$$D = \frac{\alpha_d V_f}{q_p} \times (T_C - g)$$

Une description complète du modèle RUSLE2 est faite par USDA 2008. Nous pouvons y trouver toutes les équations et variables utilisées.

Qualités	Défauts
<ul style="list-style-type: none"> - À chaque étape, le modèle réévalue les implications de la redéposition sur le flux de sédiments - Facile à utiliser - Intégrable à un GIS 	<ul style="list-style-type: none"> - Facteurs R,K,L,C,P sont différents que ceux utilisés dans USLE car le modèle fonctionne sur base journalière. Voir Ismail 2007 pour plus de détails sur les calculs - Retourne une carte sur l'érosion moyenne annuelle mais n'indique pas vraiment les zones responsables des inondations boueuses. - Considère que tous les sédiments ont la même propension à être transportés (pas de distinction en fonction de leur taille). - Formes complexes de pentes simplifiées - Uniquement érosions diffuse et en rigole considérées - La manière d'appliquer la capacité de transport de sédiment est controversée - Le runoff est utilisé pour la redéposition mais pas pour l'érosion

Sources :

Foster, G.R., Toy, T.E., Renard, K.G., 2003. *Comparison of the USLE, RUSLE1.06c, and RUSLE2 for application to highly disturbed lands*. USDA-ARS, K.G. Renard et al. (ed.) Proc. Interagency Conf. on Research in the Watersheds 154–160.

Ismail, J., Ravichandran, S., 2007. *RUSLE2 Model Application for Soil Erosion Assessment Using Remote Sensing and GIS*. Water Resour Manage 22, 83–102.

Kinnell, P.I.A., 2010. *Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review*. Journal of Hydrology 385, 384–397.

USDA, 2008. *Revised Universal Soil Loss Equation Version 2*. USDA-Agricultural Research Service Washington, D.C.

✓ (ann)AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution model)

Type de modèle : Physique, Conceptuel

Inputs : 22 paramètres (voir Young 1989)

Outputs : Volume de ruissellement à chaque cellule
Zones sources

<u>Variables</u> :	SSF	Facteur de forme de pente dans le pixel	[-]
	E	Énergie cinétique totale de la pluie	[MJ.(ha.mm) ⁻¹]
	I	Intensité maximale 30-minutes de la pluie	[mm.s ⁻¹]
	D(x)	Taux de déposition	[kg.(m ² .s) ⁻¹]
	q(x)	Débit par unité de largeur	[m ³ .(m.s) ⁻¹]
	x	Distance dans la cellule suivant l'écoulement (vers aval)	[m]
	q_s(x)	Flux de sédiment par unité de largeur	[kg.(m.s) ⁻¹]
	v_{ss}	Vitesse de sédimentation des sédiments	[m.s ⁻¹]
	g'_s(x)	Capacité de transport effective	[kg.(m.s) ⁻¹]
	η	Facteur de transport effectif	[-]
	k	Coefficient de transport	[kg.m ⁻³]
	τ	Contraintes de cisaillement	[Pa]
	v	Vitesse moyenne de flux dans la cellule (équ. de Manning)	[m.s ⁻¹]
	Q_s(x)	Débit de sédiments à l'extrémité aval de la cellule	[kg.s ⁻¹]
	Q_s(0)	Débit de sédiments à l'extrémité amont de la cellule	[kg.s ⁻¹]
	Q_{sl}(x/L_r)	Débit latéral de sédiments dans la cellule	[kg.s ⁻¹]
	L_r	La longueur d'atteinte	[m]
	w	La largeur de la cellule	[m]

AGNPS considère le runoff et le calcule grâce à la méthode SCS - Curve Number. Il considère également le « peak flow » qu'il calcule via une équation empirique initialement développée pour le modèle CREAMS. Le transport des sédiments effectif, $g'_s(x)$, est calculé grâce à l'équation de puissance de flux (« stream power ») de Bagnold.

Ce modèle, n'utilise le runoff que pour calculer la redéposition, mais pas l'érosion.

Pour faire tourner le modèle, il a besoin de connaître le % de chaque classe de particules (argile, limon, petits agrégats, grands agrégats, et sable).

Équations : Érosion : $E = (EI) K L S C P (SSF)$

$$\text{Déposition : } D(x) = \frac{v_{ss}}{q(x)} \times [q_s(x) - g'_s(x)] \quad \text{et} \quad g'_s = \eta \times g_s = \eta \times k \times \frac{\tau v^2}{v_{ss}}$$

$$\text{Transport des sédiments : } Q_s(x) = Q_s(0) + Q_{sl}(x/L_r) - \int_0^x D(x)w \, dx$$

$$Q_s(x) = \left[\frac{2 q(x)}{2 q(x) + \Delta x v_{ss}} \right] \times \left[Q_s(0) + Q_{sl} \frac{x}{L_r} - \frac{w \Delta x}{2} \left[\frac{v_{ss}}{q(0)} [q_s(0) - g'_s(0)] - \frac{v_{ss}}{q(x)} g'_s(x) \right] \right]$$

Qualités	Défauts
<ul style="list-style-type: none"> - Utilise le Run-off pour le calcul de Q_p - Tient compte de tous les types d'érosion 	<ul style="list-style-type: none"> - 5 classes de taille de particules - Lien entre le modèle et un GIS est encore à établir, même si AGNPS fonctionne déjà sur base de cellules - Le runoff est utilisé pour la redéposition mais pas pour l'érosion

Sources :

Haregeweyn, N., Yohannes, F., 2003. *Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, western Hararghe, Ethiopia*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 99, 201–212.

Bosch, D., Theurer, F., Bingner, R., Felton, G., Chaubey, I., 1998. *Evaluation of the AnnAGNPS water quality model*. Editors: John E. Parsons, Daniel L. Thomas, Rodney L. Huffman 45.

Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., Anderson, W.P., 1989. *AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds*. *Journal of soil and water conservation* 44, 168–173.

Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J., 2003. *A review of erosion and sediment transport models*. *Environmental Modelling and Software* 18, 761–799.

GISER, 2015. *Modélisation du dépôt de sédiments*.

✓ **Indice de Borselli** (Connectivité des sédiments)

Type de modèle : Empirique

Inputs : **IC** :
- MNT (facteur d_i , A, S)
- Facteur W : dépend de sa définition (info topographique ou land-use)

FIC : Caractérisation de hotspots pour validation

Outputs : Indice de connectivité (IC)

Calcul d'un indice de connectivité (IC) pour chaque pixel k . Cet indice représente le logarithme du rapport entre deux distances pondérées. Le numérateur représente la distance en amont du pixel considéré, alors que le dénominateur représente la distance en aval de ce pixel. Nous utilisons le logarithme pour tamponner les variations brutales du rapport de distances.

Le numérateur représente le potentiel que des sédiments arrivent à ce pixel, et le dénominateur représente le potentiel que le flux de sédiments aille de ce pixel jusqu'au puits.

Variables :

d_i [m] Longueur de la cellule i le long du chemin d'écoulement depuis le pixel k jusqu'au puits. Le chemin d'écoulement est établi en suivant la pente la plus raide allant du pixel k jusqu'au puits.

W_i [-] Facteur de pondération de la cellule i . Selon les articles, il peut valoir le facteur cultural C (Borselli 2008 et Jamshidi 2014), un indice de rugosité IR (Cavalli 2013), ou encore un indice d'érosion ER, fonction de la couverture végétale (Sougnéz 2011).

S_i [m.m⁻¹] Facteur de pente. Notons que, en fonction des articles, sa définition varie aussi (seuils min et max).

\bar{W}_k [-] Moyenne du facteur de pondération sur toute l'aire contributive en amont du pixel k

\bar{S}_k [m.m⁻¹] Moyenne du facteur de pente sur toute l'aire contributive en amont du pixel k

A_k [m²] Aire contributive en amont du pixel k

S_u [-] Score total des composants amont

S_d [-] Score total des composants aval

Des décisions quant à la définition des différents paramètres, mais aussi de la nature du puits sont donc à prendre afin d'implémenter ce modèle.

Étapes :

Une fois l'indice calculé pour chaque pixel, il faut le confronter à la réalité, via le calcul de FIC (Field IC). Pour ce faire, après un évènement pluvieux, aller sur le terrain et suivre le tableau proposé dans Borselli 2008 pour calculer le FIC au sein de certains « hotspots ».

Cela fait, comparer IC et FIC pour valider la méthode.

Certaines études ont également mis en évidence des méthodes pour retrouver un SDR par pixel, un SY par pixel et SSL (suspended sediment load) (Jamshidi 2014). Il est également possible de retrouver le CPS : connected pixels per surface area (Sougnez 2011).

L'article de Borselli 2008 propose une méthode pour implémenter ce modèle sur ArcGIS, et Cavalli 2013 a, lui, développé une « toolbox » avec un modèle de type « ModelBuilder ».

Équations :

$$IC_k = \log_{10} \frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} = \log_{10} \frac{\bar{W}_k \bar{S}_k \sqrt{A_k}}{\sum_{i=k,n_k} \frac{d_i}{W_i S_i}} \rightarrow \text{Calculé à partir des inputs}$$

Le numérateur reprend la moyenne des valeurs de W et S des pixels en amont du pixel k et faisant partie de la surface amont contributive au flux passant par ce pixel. Par contre, le dénominateur, lui, reprend la somme de tous les pixels en aval faisant partie du chemin d'écoulement allant du pixel k jusqu'au puits.

$$FIC = \frac{S_u + S_d}{2} \rightarrow \text{Observations sur le terrain via sous-facteurs (voir Borselli 2008)}$$

Qualités	Défauts
<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de faire varier les facteurs W (définition) et S (seuils) de telle sorte à calibrer au mieux notre modèle - Possibilité de calculer un CPS ou SDR et SSL à partir des IC calculés à chaque cellule de la grille par après (Sougnez 2011, Jamshidi 2014 respectivement) 	<p style="text-align: center;">Le modèle semble être construit de toute pièce, et l'indice de connectivité n'a pas vraiment de signification physique</p>

Sources :

Borselli, L., Cassi, P., Torri, D., 2008. *Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment*. CATENA 75, 268–277.

Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L., 2013. *Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments*. Geomorphology 188, 31–41.

Sougnez, N., van Wesemael, B., Vanacker, V., 2011. *Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain*. CATENA 84, 1–11.

Jamshidi, R., Dragovich, D., Webb, A.A., 2014. *Distributed empirical algorithms to estimate catchment scale sediment connectivity and yield in a subtropical region*. Hydrological Processes 28, 2671–2684.

Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., Roberts, A.M., 2012. *Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio*. Geomorphology 138, 74–88.

Leombruni, A., Blois, L., Mancini, M., 2009. *First Evaluation of Soil Erosion and Sediment Delivery in the High Part of the Tevere Watershed*. EJGE 14.

✓ WATEM / SEDEM

Type de modèle : Empirique

Inputs : Raster parcellaire, MNT, R, K, LS, C, P, k_{TC}

Outputs : Carte avec quantité de sédiments érodés ou déposés à chaque pixel
Rendement en sédiments $[T.an^{-1}]$
Rendement en sédiments spécifique $[T.(ha.an)^{-1}]$

Étapes :

- Taux d'érosion moyen annuel (voir équations)
- Capacité de transport (voir équations)
- « Sediment routing » : Pour chaque pixel, détermination d'un chemin d'écoulement continu jusqu'à la rivière selon certaines règles comme l'absence de chemin circulaire et l'obligation de terminer à la rivière. Selon les études, ce chemin est déterminé à l'aide du facteur de pente 2D (Van Oost 2000, Verstraeten 2006), ou 1D (moins précis... critère de pente la plus raide, Van Rompay 2001).

Variables : k_{TC} Coefficient de capacité de transport $[m]$, qui représente la proportionnalité entre le potentiel d'érosion en rigoles et la capacité de transport. Il peut être interprété comme la distance théorique en amont nécessaire pour produire assez de sédiments pour atteindre la capacité de transport à ce pixel.

T_c Capacité de transport, la quantité de sédiment à saturation $[kg.(m.an)^{-1}]$

E_{PR} Potentiel d'érosion « rill » moyen annuel $[kg.(m^2.an)^{-1}]$

E_{PIR} Potentiel d'érosion « interill » moyen annuel $[kg.(m^2.an)^{-1}]$

E_{PT} Potentiel d'érosion moyen annuel, prédit par RUSLE $[kg.(m^2.an)^{-1}]$

S_g Gradient de pente $[m.m^{-1}]$

a Coefficient $[-]$, généralement fixé à 0.6

b Coefficient qui varie en fonction des études :
8.3 (Van Oost 2000), 6.86 (Van Rompay 2001)

Calibration : Le seul paramètre à calibrer est le coefficient de capacité de transport k_{TC} . Celui-ci varie en fonction du type de sol et d'occupation du sol. Plusieurs problématiques se posent quant à cette calibration. Une méthode de calibration fait appel à des mesures par radioactivité au ^{137}Cs (Van Oost 2000), ce qui est très contraignant, surtout si la calibration est à faire à l'échelle d'un grand bassin versant. La deuxième problématique est que la calibration est à refaire dès que nous changeons d'endroit d'étude, ou même lorsque nous changeons la résolution dans le GIS. Une étude (Verstraeten 2006), quant à elle, a repris les valeurs de k_{TC} de Van Oost 2000 (calibration du coefficient d'une part pour les terres arables, et d'autre part pour toutes les autres terres en 3 sites d'études sur la ceinture limoneuse belge), et les a fait varier légèrement tout en gardant le même ratio entre le coef. « arable »

et le coef. « autre ». Ils ont testé plusieurs combinaisons de coefficients sur plusieurs zones d'étude afin de valider la meilleure, en comparant les valeurs de rendement en sédiments prédites et mesurées sur le terrain.

Notons que la calibration par radioactivité au ^{137}Cs n'est pas parfaite. Son avantage est qu'elle détermine le taux d'érosion à long-terme, mais elle possède l'inconvénient qu'elle reflète l'effet combiné de toutes les formes d'érosion.

Équations :

$$E = R \times K \times LS_{2D} \times C \times P$$

$$E_{PR} = E_{PT} - E_{PIR}$$

$$E_{PT} = RKLS$$

$$E_{PIR} = aRK_{IR}S_{IR}$$

$$S_{IR} = b \times S_g^{0.8}$$

$$T_C = k_{TC} \times E_{PR} = k_{TC} \times (RKLS - aRK_{IR}S_{IR}) = k_{TC} \times R \times K \times (LS - a \times S_{IR})$$

Qualités	Défauts
<ul style="list-style-type: none"> - Utilise un facteur pente à 2D - Le modèle inclus des coefficients qui gèrent la proportion de sédiments qui passent d'une parcelle à l'autre 	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup d'inputs - Résultats dépendent de la résolution du MNT - Facteur k_{TC} à calibrer au césium radioactif dès qu'on change de contexte (solution = valider avec autre coefficient en gardant le même ratio arable/autres) - Ne considère pas les phénomènes de redéposition ou d'érosion dans les rivières mêmes → ce qu'on calcule = ce qui arrive tout le long de la rivière

Sources :

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

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

Verstraeten, G., 2006. *Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data*. *Geomorphology* 81, 128–140.

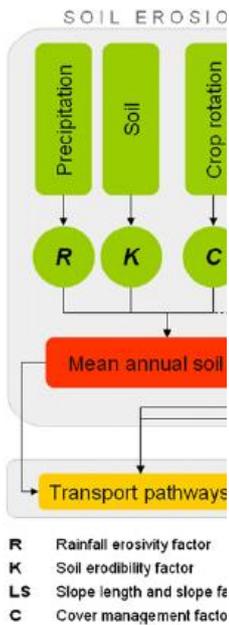
de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., Govers, G., 2008. *Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain*. *Global and Planetary Change* 60, 393–415.

✓ ABAG-flux

Type de modèle : Empirique

Inputs : MNT, R, K, L, C, P

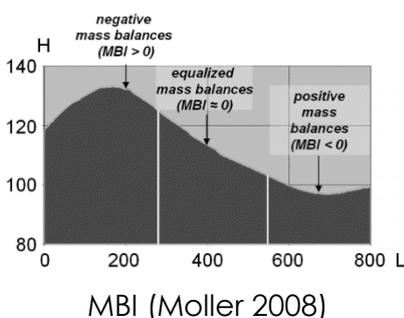
Outputs : Zones connectées aux rivières,
Zones de transfert,
Hotspots,
Quantités potentielles de sol apportées



Structure du modèle ABAG-flux (Volk 2010)

La structure de base du modèle est de type USLE, à laquelle sont rajoutées des propriétés :

- **Flow accumulation algorithm** : TOPMODEL (Quinn 1991)
- **Fonction de barrière** : accumulation de sédiment remise à 0 aux routes, frontières des champs, dépressions naturelles, etc. Cette fonction permet de fragmenter la pente en de plus petits segments et donc de travailler avec des longueurs de pente plus réalistes.
- **Indice de bilan de masse (MBI)** : voir Moller 2008) : permet de déterminer des zones de sédimentation potentielle.



Cette méthode tente d'identifier les zones où il y a érosion, et les zones où il y a déposition. L'indice MBI est fonction des facteurs pente (n), courbure moyenne (k), et distance verticale au réseau de chenaux (ht).

Voir article Moller 2008 pour plus de détails.

Méthode SICOM : Regroupement (*clustering*) et classification (*ranking*) des résultats USLE obtenus

Les valeurs d'érosion obtenues par USLE sont regroupées grâce à la méthode « *k means cluster analysis* », qui permet de mieux intégrer la variabilité au sein même des résultats (mieux qu'une classification par seuils classique). Il s'agit d'une méthode qualitative et statistique réalisée grâce au logiciel R.

Une fois le regroupement fait, nous avons différentes classes de comparaison (C_i), et un indice de comparaison (CI) est construit (voir le paragraphe « Équations ») pour une certaine surface. La variable A_{C_i} représente la proportion de C_i dans la surface étudiée. Nous obtenons ainsi une valeur de CI par surface étudiée, ce qui nous permet de comparer de manière relative ces différentes surfaces au sein de la zone totale étudiée.

Cette méthode nous permet d'analyser les valeurs d'érosion obtenues de manière relative, et nous permet ainsi de nous débarrasser des résultats absolus (souvent non-validés). De plus, des évaluations à différentes échelles (fonction de la taille des surfaces étudiées) peuvent être réalisées.

Équations :
$$CI = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times A_{C_i})}{n \times 10} \in [0,10]$$

Qualités	Défauts
<ul style="list-style-type: none"> - Analyse relative des résultats USLE → permet de nous séparer des valeurs absolues souvent biaisées - Regroupement et classement des résultats USLE (<i>k means cluster analysis</i>) - Peut s'appliquer aux BV, fermes, champs, entités géomorphologiques ou partie de pente 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertitudes de la méthode USLE - Pas de validation

Sources :

Volk, M., Möller, M., Wurbs, D., 2010. *A pragmatic approach for soil erosion risk assessment within policy hierarchies*. Land Use Policy 27, 997–1009.

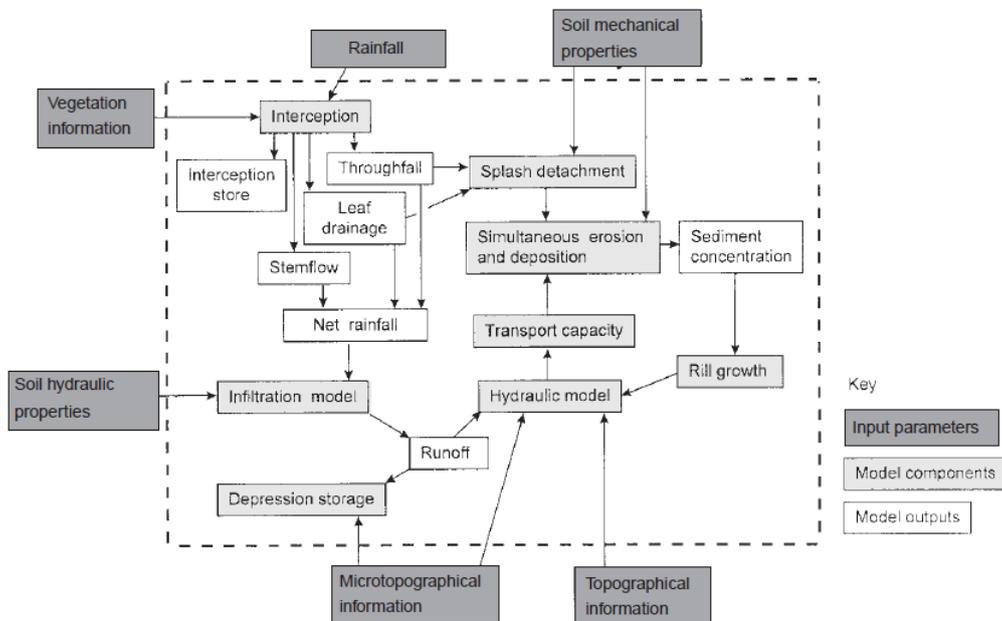
Möller, M., Volk, M., Friedrich, K., Lymburner, L., 2008. *Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 419–430.

✓ EUROSEM

Type de modèle : Physique

Inputs : Très nombreux : Paramètres hydrologiques et de végétation nombreux et pas toujours physiquement mesurables : précipitation, microtopographie et topographie, végétation, propriétés hydrauliques et mécaniques du sol (conductivité hydraulique du sol, quantité de pluie déjà absorbée par le sol, capillarité, contenu du sol en eau, valeur initiale du contenu en eau, fraction charge caillouteuse à la surface, Manning, rayon hydraulique, pente, périmètre mouillé, largeur du chenal en amont)

Outputs : Ruissellement total
Érosion totale
Divers graphes « sédiments »



Structure du modèle EUROSEM (Morgan 1998)

Comme le montre cette figure, la structure du modèle est très complexe.

À nouveau, ce modèle tient compte de la capacité de transport en sédiment des écoulements (TC). Ici, les auteurs distinguent la **TC** « rill » (en rigoles) (fonction de la puissance de flux unitaire, elle-même fonction de paramètres hydrauliques) et la **TC interrill** (entre les rigoles) (fonction de la puissance de flux modifiée).

Notons que le modèle LISEM possède la même structure que EUROSEM, à l'exception que LISEM peut être intégré à un GIS.

<u>Variables</u> :	ω	Puissance de flux unitaire	[cm.s ⁻¹]
	u	Vitesse moyenne du flux	[m.s ⁻¹]
	s	Pente	[%]
	TC	Capacité de transport (concentration)	[m ³ .m ⁻³]

C	Concentration en sédiments	[m ³ .m ⁻³]
ω_{cr}	Valeur critique de puissance de flux unitaire	(= 0.4 [cm.s ⁻¹])
c et η	Coefficients expérimentaux déterminés par d ₅₀ (équ. dans Morgan 1998)	
d₅₀	Taille médiane des particules de sol	[μm]
ρ_s	Densité de sédiments	[kg.m ⁻³]
b	Coefficient expérimental déterminé par d ₅₀ (équ. dans Morgan 1998)	
Ω	Puissance de flux unitaire modifiée (Bagnold)	[g ^{1.5} .cm ^{-2/3} .s ^{-4.5}]
Ω_c	Puissance de flux unitaire modifiée critique	
n	Rugosité de Manning	[m ^{-1/3} .s]
U*	Vitesse de cisaillement	[m.s ⁻¹]
h	Hauteur du flux sur le sol	[m]
g	Accélération gravitaire	[m.s ⁻²]
y_c	Vitesse de cisaillement critique de Shield modifiée, basée sur le nombre de Reynolds	[m.s ⁻¹]
q	Flux entrant latéral (de « interrill » à « rill »)	[m ³ .(s.m) ⁻¹]
w	Largeur du flux	[mm]
β	Coefficient d'efficacité de détachement des particules du flux	[-]
v_s	Vitesse de sédimentation des particules	[m.s ⁻¹]
DR	Taux d'érosion par impact de la pluie	[m ³ .(s.m) ⁻¹]
DF	Taux d'érosion par le flux	[m ³ .(s.m) ⁻¹]
e	Taux d'érosion net	[m ³ .(s.m) ⁻¹]

Équations :

Déposition : « Rill » : $\omega = 10 u s$
 $TC = c (\omega - \omega_{cr})^\eta$ pour toutes les tailles de particules (50 à 250 μm)
 Calcul de c et η : voir équation dans Morgan 1998.

« Interrill » : $TC = \frac{b}{\rho_s q} [(\Omega - \Omega_c)^{\frac{0.7}{n}} - 1]^5$ pour les particules de 33 à 390 μm
 Calcul de b, Ω, Ω_c, U* : voir équation dans Morgan 1998.

Taux d'érosion net : $e = DR + DF = DR + \beta w v_s (TC - C)$

Qualités	Défauts
- Tient compte d'un grand nombre de paramètres influençant l'érosion	- Beaucoup d'inputs - Pas intégrable à un GIS

Sources :

Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., 1998. *The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments*. Earth Surface Processes and Landforms 23, 527–544.

GISER, 2015. *Modélisation du dépôt de sédiments*.

✓ **SPADS** (Spatially Distributed Scoring model)

Type de modèle : Semi-quantitatif (scores)

Inputs : 6 facteurs « scores » : V - Couverture végétale
T - Topographie
L - Lithologie
R - Intensité pluie
G - Gully (ravines)
[m⁻¹] iD - Distance inverse par rapport à un cours d'eau

Outputs : Indice pour chaque pixel → Détermination des zones source de sédiments
Moyenne des indices sur le BV → Rendement en sédiments à l'exutoire

SPADS reprend les modèles de cotations factoriels FSM et PSIAC, et améliore leurs caractéristiques. Nous avons ici, contrairement à FSM et PSIAC, un modèle spatialement distribué. De plus, les cotations de chaque facteur ne se font plus à l'aide d'experts de manière subjective, mais bien à l'aide de données quantitatives objectives.

Le facteur « Gully » est estimé important car il a été montré dans la littérature que la présence de ravines influençait considérablement les connections entre les différentes zones et les cours d'eau dans le BV, et avait une importance non-négligeable en terme de source de sédiments.

Le facteur « iD » est repris afin de donner davantage de poids aux surfaces proches des rivières et chenaux. En effet, les sédiments provenant de ces zones sont plus susceptibles d'augmenter le SY que les sédiments des zones plus lointaines, qui eux ont plus de chance de se redéposer avant d'atteindre les rivières. Il faudrait remplacer le facteur iD par inverse distance aux infrastructures dans notre cas.

Possibilité de retrouver le SSY à partir de l'indice (voir tableau 1 de Vente 2013)

Équations : $Index = V \times T \times L \times R \times G \times iD$

Voir tableau 1 dans de Vente 2008 pour critères de classification pour chaque facteur.

Qualités	Défauts
<ul style="list-style-type: none"> - Inputs et outputs spatialement distribués - La carte des indices retournés représente les zones sources de sédiments - Tient compte de l'érosion diffuse, en rigoles, ravine, chenaux et glissement de terrain - Comparé à FSM et PSIAC, scores obtenus de manière + objective via des données quantitatives 	<ul style="list-style-type: none"> - Les zones proches des rivières sont mises inévitablement en évidence à cause du facteur iD - Le modèle ne considère pas vraiment la redéposition dans le paysage, et n'en tient que grossièrement compte via le facteur iD

Sources :

De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., Arabkhedri, M., Boix-Fayos, C., 2013. *Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand?* Earth-Science Reviews 127, 16–29.

de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., Govers, G., 2008. *Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain*. Global and Planetary Change 60, 393–415.

✓ STREAM

Type de modèle : Semi-quantitatif (scores) + physique

Inputs : 4 classes : Rugosité (4 classes)
Couverture végétale (2 classes)
Intensité de pluie de 6 minutes (3 classes)
Encroustement du sol (4 classes)

Outputs : Gamme de concentration en sédiments

STREAM est un modèle construit sur base de données de références (runoff, érosion,...) issues d'un nombre considérable de bassins versants/situations différent(e)s.

Un tableau existe pour connaître la gamme de charge en sédiments du flux, en fonction des classes dans lesquelles nous nous trouvons dans chaque cellule. En fonction de la combinaison de valeurs de classes, nous avons une valeur de taux d'infiltration et de charge en sédiments. Ensuite, le modèle STREAM devient plus « physique » : il fait appel à différentes équations et calcule un bilan de masse. Si une cellule possède des caractéristiques telles qu'il n'est pas possible de la situer dans le tableau, une analyse statistique multicritère, via données floues, est nécessaire.

Il a été observé qu'au plus le runoff était important, au plus faible était la concentration en sédiments.

Le principe de ce modèle repose sur le calcul de la concentration en sédiment à chaque cellule de l'amont vers l'aval, en prenant en compte à chaque fois le runoff des pixels en amont.

Déposition : Négligée en plot scale, mais considérée à l'échelle d'un BV.

Elle est liée à la capacité de transport, qui varie en fonction de la topographie (raideur et courbure verticale des pentes), des variations de flux, ainsi que de la couverture végétale.

Attention : la déposition qui se fait le long des chemins d'écoulement (runoff tailing) n'est pas prise en compte !

La déposition est prise en compte à l'aide de seuils :

- Raideur pente < 2 % et courbure verticale < -0.55 → [sed] > 10g.L⁻¹ est déposé
- Pour le facteur de couverture végétale : distinction entre les zones de prairies permanentes et les zones agricoles couvert végétal dense

2 types de surface : 1) Une zone qui a le potentiel d'infiltrer une partie ou la totalité du run-on de l'amont.

2) Une zone produisant du runoff.

<u>Variables</u> :	md_α	Masse de sédiments quittant le pixel α	[g]
	mu_i	Masse de sédiments arrivant du pixel supérieur i	[g]
	R	Hauteur de pluie	[mm]
	I_α	Capacité d'infiltration du pixel α	[mm.s ⁻¹]
	t	Durée de la pluie	[s]

a	Aire d'un pixel	[m ²]
Vu_i	Ruissellement amont entrant dans le pixel i	[L]
SC_α	Concentration potentielle en sédiments	[g.L ⁻¹]

Équations : $md_\alpha = \sum mu_i + \frac{(R-I_\alpha t)a \sum mu_i}{\sum Vu_i}$ et $md_\alpha = \sum mu_i + (R - I_\alpha t)aSC_\alpha$

Qualités	Défauts
<ul style="list-style-type: none"> - GIS compatible - Déposition à l'échelle du BV est considérée 	<ul style="list-style-type: none"> - Déposition le long du chemin d'écoulement (runoff tailing) n'est pas prise en compte - Déposition basée sur des seuils déterminés expérimentalement, de manière empirique

Source :

Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Saby, N., 2002. *Modelling interrill erosion in small cultivated catchments*. Hydrological Processes 16, 3215–3226.

✓ **CSSM** (Coleman & Scatena Scoring Model)

Type de modèle : Semi-quantitatif (scores)

Inputs : 4 facteurs « **on-site** » : Occupation du sol
Couverture végétale
Topographie
Érodibilité du sol
2 facteurs « **off-site** » : Transport des sédiments
Connectivité (proximité cours d'eau
et zones tampon)

Outputs : Score cumulé (somme) pour chaque zone

Variables : Land Use/Ground Cover Topographie
Érodibilité du sol Sediment delivery
Sediment Control Période de perturbation
Contribution de l'amont Contribution des chenaux
Contribution future

CSSM est un modèle qui a été développé pour situer les zones sources de sédiments. Les zones ont été distinguées en 4 grands types : Agricoles, Construction, Mines gravier/sable, et cours d'eau. Une zone tampon efficace est définie comme une surface sans rigoles/ravines et avec des microtopographies capables d'intercepter une quantité suffisante de sédiments. La notation en scores de chaque facteur se fait suivant le tableau (8) présent dans *de Vente 2005* :

Factors used in the sediment delivery assessment model of Coleman and Scatena (CSSM) (based on Coleman and Scatena, 1986)

Factor	High (10)	Moderate (5)	Low (0)
Land use	(a) >50% crops, (b) <50% crops but poorly maintained	(a) <25% crops, (b) active pasture, (c) effective conservation	(a) fallow or abandoned, (b) conservation tillage, (c) orchard
Ground cover ^a	<20%	20–40%	>40%
Topography	steep upland slopes: >40%	moderate upland slopes: 20–40%	gentle slopes: 0–20%
Soil erodibility	$K^b > 0.37$	$0.25 < K^b < 0.37$	$K^b < 0.25$
Sediment delivery	(a) adjacent to water course, (b) no buffer zones	(a) not adjacent to water course, (b) adequate buffer zones	(a) not adjacent to water course, (b) effective buffer zones
Upland contribution ^c	(a) channel aggradation, (b) braiding, (c) buried vegetation	(a) mid-channel bars, (b) silt drapes	no apparent channel modification
Channel contribution ^c	(a) active cut banks, long extent exposed to water, (b) pronounced U-shaped, enlarging channel	occasional bank erosion: (a) active cut bank in meander, (b) banks subject to high water flow force	protected or vegetated banks
Future supply ^c	(a) thick valley bottom deposits, (b) wide flood plain, (c) active meanders	normal channel activity	(a) protected banks, (b) narrow or no flood plains
Sediment control ^a	(a) do not exist, (b) not effective, off-site sediment delivery	control exists but (a) not maintained; (b) incomplete coverage	controls are adequate: (a) maintained, (b) good coverage
Disturbance period ^a	(a) >1 year disturbance, (b) no evidence of reclamation after mining	(a) disturbance between 1 month and 1 year, (b) reclamation after mining is reducing sediment yield	(a) disturbance <1 month, (b) reclamation complete and effective in erosion reduction

After scoring for all factors per source area, a class can be determined based on the summed score

	Very high	High	Moderate	Low
Agricultural areas	30–40	20–30	10–20	0–10
Construction sites	50–60	30–50	15–30	0–15
Surface mines	50–60	35–50	15–35	0–15
Stream channels	20–30	15–20	5–15	0–5

^a These factors are only used for construction sites and surface mines.

^b Erodibility is assessed by the USLE K factor for erodibility.

^c These factors are only used for assessment of stream channels.

Qualités	Défauts
<ul style="list-style-type: none"> - Identifie les principales zones sources contribuant au « sediment yield ». Permet de déterminer quel est le principal processus responsable du détachement et du transport des sédiments. - Tient compte des zones de construction et mines, et autres perturbations humaines 	<ul style="list-style-type: none"> - Redéposition estimée seulement indirectement à l'aide des facteurs « off-sites »

Sources :

Coleman, D.J., Scatena, F.N., 1986. *Identification and evaluation of sediment sources. Drainage basin sediment delivery. Proc. symposium, Albuquerque, 1986* 3–18.

de Vente, J., Poesen, J., 2005. *Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. Earth-Science Reviews* 71, 95–125.

6. Caractérisation du risque d'inondation boueuse sur les récepteurs de risque lors d'événements pluvieux intenses

6.1. Résumé

Lors de cette dernière décennie, la Wallonie a connu en de nombreux endroits des inondations boueuses. L'avènement de tels épisodes a un impact financier considérable pour la restauration des zones et infrastructures touchées, mais aussi un impact psychologique sur la population touchée, parfois à plusieurs reprises. Les facteurs influençant la probabilité d'observer une inondation boueuse sur un récepteur de risque est logiquement fonction des propriétés du bassin versant en amont de celle-ci.

L'objectif principal de cette étude est double. Le premier objectif est de quantifier le risque d'inondations boueuses pour chaque récepteur en Wallonie. Ce premier objectif s'articule en deux grandes étapes, à savoir le classement de chaque type de récepteur de risque en termes de vulnérabilité aux inondations boueuses, et ensuite la quantification de la probabilité qu'un récepteur de risque connaisse effectivement une inondation boueuse.

Cela fait, le second objectif consiste en la détection, dans le paysage, des parcelles principalement responsables des inondations boueuses atteignant les récepteurs les plus à risque.

Jusqu'ici un protocole a été construit, et a été en partie mis en place. Nous avons ainsi utilisé une démarche pairée pour la détermination de l'aléa d'inondation boueuse en associant à chaque SIGISER un site proche et de dimensions équivalentes qui n'a *a priori* pas été affecté par des inondations boueuses. Plusieurs indices et facteurs ont été calculés pour les sites pour lesquels aucune inondation boueuse n'a jamais été signalée, et pour les 453 SIGISER répertoriés jusqu'aujourd'hui.

Une analyse exploratoire des résultats a ensuite été effectuée. Plusieurs statistiques sur les différents indices et facteurs calculés en chacun des sites ont été analysées. Les résultats ont par après été utilisés dans des régressions logistiques simples et multiples afin de trouver la meilleure relation entre ces facteurs et l'aléa d'inondation boueuse.

La meilleure combinaison de facteurs peut ainsi être utilisée pour la détermination de l'aléa en un site quelconque. En croisant la vulnérabilité avec l'aléa des récepteurs de risque, le risque d'inondation boueuse peut être déterminé. Cela fait, l'étape finale du protocole, à savoir la détection dans le paysage des parcelles principalement responsables de l'arrivée de sédiments aux récepteurs considérés « à risque » lors d'inondations boueuses, pourra être effectuée.

6.2. Introduction

Lors de cette dernière décennie, la Wallonie a connu, en de nombreux endroits, des inondations boueuses. L'avènement de tels épisodes a un impact financier considérable pour la restauration des zones et infrastructures touchées, mais aussi un impact psychologique sur la population touchée, parfois à plusieurs reprises.

Les facteurs influençant la probabilité d'observer une inondation boueuse sur un récepteur de risque est logiquement fonction des propriétés du bassin versant en amont de celle-ci. Nous pouvons citer comme propriétés la topographie, l'occupation du sol, la présence de mesures anti-érosives, la rugosité hydraulique du sol, ainsi que les propriétés pédologiques.

6.3. Objectifs poursuivis

L'objectif de cette étude est double. Le premier objectif est de quantifier le risque d'inondations boueuses pour chaque récepteur en Wallonie. Ce premier objectif s'articule en deux grandes étapes, à savoir le classement de chaque type de récepteur de risque en termes de vulnérabilité aux inondations boueuses, et ensuite la quantification de la probabilité qu'un récepteur de risque connaisse effectivement une inondation boueuse.

Cela fait, le second objectif consiste en la détection, dans le paysage, des parcelles principalement responsables des inondations boueuses atteignant les récepteurs les plus à risque.

6.4. Quantification du risque d'inondation boueuse pour chaque récepteur en Wallonie

L'objectif est ici de quantifier le risque d'exposition aux inondations boueuses des différents récepteurs de risque en Wallonie. Pour ce faire, comme dit précédemment, la vulnérabilité face à ce genre de catastrophe ainsi que l'aléa doivent tous deux être quantifiés. C'est en croisant ces deux variables pour chaque récepteur de risque en Wallonie que nous pouvons caractériser le risque d'inondation boueuse en tant que tel.

6.4.1. Définition d'un récepteur de risque

Nous considérons un récepteur de risque (ou enjeu) comme toute personne, objet, terrain ou activité qui pourrait subir un préjudice ou des dommages dans le cas d'une inondation boueuse.

Dans un contexte d'inondation (directive cadre inondation, SPW - DGO3 – DCENN), une liste de catégories d'enjeux a déjà été dressée (GISER 2015) :

- Population touchée (nombre d'habitants)
- Activités économiques de service (services administratifs, équipements scolaires, services social et de santé, police, pompier et protection civile)

- Activités économiques du secteur marchand (commerces, industrie, zones portuaires, aéroports et aérodromes)
- Activités récréatives (campings)
- Infrastructures agricoles (bâtiments agricoles, serres)
- Installations (cabine électrique, cabines destinées au transport, au conditionnement ou à la distribution de gaz, cabines téléphoniques, électricité, équipements de télécommunication)
- Stations d'épuration
- Activités sources de pollution (décharges et friches industrielles, sites SEVESO et EPTR : European Pollutant Release and Transfer Register)
- Biens classés
- Réseau de transport (autoroutes, routes principales, rings, bretelles, routes secondaires, routes locales telles que définies par NAVTEQ)
- Zones vulnérables d'un point de vue environnemental (captage d'eau de surface et souterraines, zones vulnérables aux nitrates, sites NATURA 2000 et autres réserves...)
- Bassins d'orages du PASH (existants, en construction ou à réaliser)

6.4.2. Caractérisation de la vulnérabilité des récepteurs de risque aux inondations boueuses

Cette étape vise à quantifier le degré de gravité de l'occurrence d'une inondation boueuse sur chaque type de récepteur de risque. Cette étape a déjà été réalisée pour le risque d'inondation en 2008 dans le rapport intitulé « Cartographie du risque de dommages dû aux inondations par débordement de cours d'eau ». Au Tableau 22, nous retrouvons une classification de la vulnérabilité des récepteurs en fonction de leur nature.

Cette classification est à adapter au contexte « érosion » dans lequel s'inscrit la problématique des inondations boueuses. Certaines modifications à ce tableau, en concertation avec le SPW, seront ainsi nécessaires en vue d'une meilleure considération de notre sujet de recherche.

Tableau 22 : IDENTIFICATION DES ENJEUX À REPRÉSENTER ET VULNÉRABILITÉ ASSOCIÉE (SPW, 2008)

Identification des enjeux à représenter et vulnérabilité associée (enjeux réels)				
	Vulnérabilité élevée	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité négligeable
Agriculture	Équipements agricoles <i>(siège de l'exploitation, bâtiments, hangars, serres)</i>		Terres agricoles <i>(cultures, prairies, sylviculture)</i>	Terres vaines et vagues
Espaces naturels				Bois, espaces naturels, friches Plans d'eau Zones humides
Activités de loisirs et récréatives	Terrains de camping* Bâtiments pour activités de loisirs et récréatives <i>(cinémas, centres culturels, salles de sport, etc.)</i>	Installations pour activités de loisirs et récréatives composé de superstructures légères <i>(cours de tennis, vélodromes, tribunes, etc.)</i>	Terrains pour activités de loisirs et récréatives <i>(terrains de sport, plaines de jeux)</i>	
Habitat	Habitations et dépendances <i>(garages, remises, etc.)</i> Habitations de vacances			Friches urbaines <i>(terrains nus ou désaffectés)</i>
Activités économiques	Activités économiques non agricoles <i>(Industries, commerces, services)</i> <i>Mention particulière : installations classées, sites seveso* et CET*</i>	Autres activités économiques non agricoles <i>(carrières, quais, pisciculture)</i>		Friches industrielles <i>(terrains nus ou désaffectés)</i> <i>Mention particulière : friches douteuses</i> Carrières et terroirs abandonnés
Voirie	Routes principales (autoroutes et nationales) Voies ferrées et gares* Ponts	Autres routes (routes secondaires)	Chemins trottoirs, places publiques parkings de plein air	
Équipements communautaires et de services publics	Équipements communautaires et de services publics <u>comprenant :</u> Centres de soins* Établissements d'enseignements* Établissements pour public fragilisé* Police*, pompiers* Administrations participant à la gestion de crise* Autres administrations* Production d'eau potable* Complexe d'assainissement (STEP)* Équipements de télécommunication* Production ou distribution d'électricité* Production ou distribution de gaz* Bâtiments ou équipements militaires Bâtiments exceptionnels*	Autres équipements communautaires & SP <u>comprenant :</u> Cimetières Aérodromes secondaires (loisirs dominants) Terrains militaires	Jardins publics ou privés	
<p>Légende : Par défaut, tous les enjeux sont repris comme éléments surfaciques * Les enjeux repris comme éléments ponctuels Exemples d'enjeux <i>En italique : mentions si possibilités liées aux données</i></p>				

6.4.3. Caractérisation de l'aléa d'une inondation boueuse sur un récepteur de risque

L'objectif de cette étape est de quantifier la probabilité qu'une inondation boueuse atteigne les différents récepteurs de risque en cas d'événement pluvieux intense. Pour ce faire, nous devons sélectionner un modèle (ou une combinaison de modèles) idéal pour notre contexte, que nous allons utiliser pour quantifier l'aléa du risque d'inondation boueuse.

✓ Sélection de modèles/indicateurs

Nous avons ici besoin d'un modèle permettant de quantifier les processus d'érosion mais aussi de redéposition des sédiments. En effet, de sérieux écarts à la réalité peuvent apparaître si nous négligeons les processus de redéposition des sédiments le long du chemin d'écoulement des inondations boueuses.

Il est également important d'utiliser un modèle spatialement distribué, et intégrable à un système d'information géographique, afin d'identifier les parcelles principalement responsables de l'arrivée de sédiments sur les récepteurs considérés « à risque ».

Un critère supplémentaire dans le choix de notre modèle est le fait que celui-ci doit idéalement pouvoir prédire sans biais l'érosion et la redéposition le plus indépendamment possible de l'échelle spatiale de prédiction.

Pour caractériser la propension d'un récepteur de risque à être endommagé par une inondation boueuse à la suite d'un événement pluvieux intense, trois indices différents sont proposés :

- Le calcul de la production de sédiments du bassin versant par la méthode RUSLE
- L'indicateur de connectivité des sédiments de Borselli (Borselli et al., 2008)
- La combinaison de ces deux indicateurs, que nous nommerons « Borselli modifié ».

La comparaison entre les résultats issus de ces différentes méthodes, ainsi qu'avec la réalité de terrain (via la base de données GISER), nous permet de constater leurs points forts et faibles, et d'ajuster/calibrer certains paramètres ou formulation propres à chacun.

Le premier indicateur que nous avons sélectionné est le modèle empirique **RUSLE** (« Revised Universal Soil Loss Equation »). Sa formulation est la suivante (Équation 14).

$$E_k = R_k \times K_k \times LS_k \times C_k \times P_k \times S_{pixel} \quad (14)$$

Avec :

E_k	[T]	La perte de sol sur le pixel k .
R_k	$\left[\frac{\text{MJ.mm}}{\text{ha.h}} \right]$	L'érosivité de la pluie sur le pixel k .
K_k	$\left[\frac{\text{T.h}}{\text{MJ.mm}} \right]$	L'érodibilité du sol sur le pixel k .
LS_k	[-]	Le facteur de longueur et gradient de pente (méthode de Desmet & Govers, 1996) du pixel k .

C_k	[-]	Le facteur cultural [0-1] du pixel k .
P_k	[-]	Le facteur « mesures anti-érosives » [0-1] du pixel k . Ce facteur est posé comme étant égal à 1 (pas de mesures).
S_{pixel}	[ha]	La surface unitaire des pixels (MNT de 10 mètres de résolution : 100 m ²).

RUSLE est une méthode empirique et la plus commune pour quantifier l'érosion sur une parcelle (Wischmeier & Smith, 1978 et Kinnell, 2010). Elle ne considère cependant pas la redéposition⁴. Cette équation et la méthode de calcul des différents termes ont été décrites en détail dans le rapport GISER « Convention de recherche d'intérêt général gestion intégrée sol érosion ruissellement », Chapitre 3 (mars 2011) et ses annexes (Biielders & Degré, 2011).

Le second modèle sélectionné est le calcul de l'**indice de Borselli** (Borselli et al., 2008). Cet indice, calculé en chaque pixel d'un MNT, donne une indication sur la connectivité des sédiments en ce pixel. La connectivité est estimée par rapport à un « puits », considéré généralement comme l'exutoire du bassin versant (Figure 53). Dans notre cas, le puits correspond à un récepteur de risque en particulier. Cet indice a l'avantage d'être adimensionnel.

Voici la formulation de l'indicateur de Borselli (Équation 15).

$$IC_k = \log_{10} \frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} = \log_{10} \frac{\bar{W}_k \bar{S}_k \sqrt{A_k}}{(\sum_j \bar{W}_j \bar{S}_j)_k} \quad (15)$$

Avec :

IC_k	[-]	Indice de connectivité des sédiments de Borselli du pixel k ($-\infty < IC < +\infty$).
d_i	[m]	Longueur de la cellule i (prise dans le sens de l'écoulement) faisant partie du chemin d'écoulement depuis le pixel k jusqu'au puits. Le chemin d'écoulement est établi en suivant la pente la plus raide allant du pixel k jusqu'au puits.
$W_{j,k}$	[-]	Facteur de pondération de la cellule i , qui reflète l'occupation du sol. Selon les articles, il est possible d'utiliser le facteur cultural C (Borselli et al., 2008 et Jamshidi et al., 2014), un indice de rugosité IR ($W \sim 1/\text{rugosité}$) (Cavalli et al., 2013), ou encore un indice d'érosion ER , fonction de la couverture végétale et indépendant des autres facteurs repris dans le calcul de cet indice (Sougnez et al., 2011). Dans notre cas, nous utilisons le facteur C comme facteur de pondération.
$S_{j,k}$	[m.m ⁻¹]	Facteur de pente. Notons que, en fonction des articles, sa mise en œuvre varie (utilisation ou non de seuils min et max).
\bar{W}_k	[-]	Moyenne des facteurs de pondération sur toute l'aire contributive en amont du pixel k .
\bar{S}_k	[m.m ⁻¹]	Moyenne des facteurs de pente sur toute l'aire contributive en amont du pixel k .
A_k	[m ²]	Aire contributive en amont du pixel k .

⁴ Le modèle RUSLE2, lui, considère la redéposition. Il s'agit d'un modèle de type physique. (USDA, 2008)

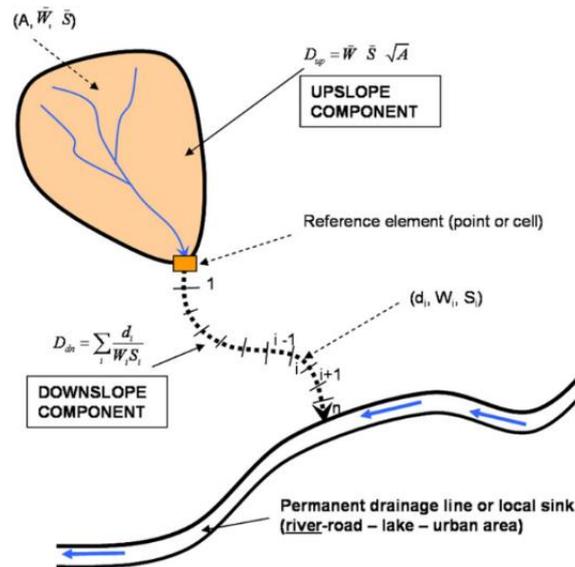


Figure 53 : DÉFINITION DANS LE PAYSAGE DES COMPOSANTS AMONT ET AVAL DE L'INDICE DE CONNECTIVITÉ DE BORSELLI (BORSELLI ET AL. 2008)

Ces auteurs se sont ainsi intéressés à quantifier la connectivité au sein d'un bassin versant. L'indice qu'ils ont construit se calcule en chaque pixel du bassin considéré. Au plus l'indice d'un pixel prend une valeur élevée, au plus celui-ci est « connecté » au puits. Comme dit précédemment, le puits peut être fixé arbitrairement (exutoire, axe routier, cours d'eau, infrastructure, site d'intérêt écologique,...).

Dans le calcul de l'indice de connectivité de Borselli, le numérateur (composant amont $D_{up,k}$) représente le potentiel de production de sédiments en amont du pixel considéré compte tenu de la pente, de l'aire contributive en amont, et d'un facteur de pondération qui est d'autant plus élevé que l'occupation du sol favorise la production de sédiments (Vigiak et al., 2012). Le dénominateur (composant aval $D_{dn,k}$), lui, représente la propension du chemin d'écoulement, en aval du pixel considéré, à favoriser ou non la redéposition. Cette propension est d'autant plus forte que la distance à parcourir est importante, que la pente est faible et que l'occupation du sol favorise le freinage hydraulique (rugosité élevée) (Vigiak et al., 2012).

Finalement, l'indice « **Borselli modifié** » est un indice reprenant certaines particularités propres à chacun des deux premiers indices, afin d'obtenir une formulation finale reprenant les avantages propres à chacun de ceux-ci.

Voici la formulation de l'indice de Borselli modifié (Équation 16).

$$IC_{k,new} = \log_{10} \frac{(\sum_i R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times S_{pixel})_k}{(\sum_j \frac{d_j}{C_j S_j})_k} \quad (16)$$

Avec :

- $IC_{k,new}$ [T.m⁻¹] L'indice de Borselli modifié du pixel k.
- $R_{i,k}$ $\frac{[MJ.mm]}{[ha.h]}$ Facteur d'érosivité d'une pluie de projet sur le pixel i faisant partie de l'aire contributive en amont du pixel k.

$K_{i,k}$	$\left[\frac{\text{T.h}}{\text{MJ.mm}} \right]$	Facteur d'érodibilité du sol sur le pixel i faisant partie de l'aire contributive en amont du pixel k .
$LS_{i,k}$	[-]	Facteur de longueur et gradient de pente (formulation de Desmet & Govers, 1996) sur le pixel i faisant partie de l'aire contributive en amont du pixel k .
$C_{i,k}$	[-]	Facteur cultural sur les pixels faisant partie de l'aire contributive en amont du pixel k .
S_{pixel}	[ha]	La surface unitaire des pixels (MNT de 10 mètres de résolution : 100 m ²)
d_j	[m]	Longueur de la cellule j (prise dans le sens de l'écoulement) faisant partie du chemin d'écoulement depuis le pixel k jusqu'au puits. Le chemin d'écoulement est établi en suivant la pente la plus raide allant du pixel k jusqu'au puits.
C_j	[-]	Facteur de pondération de la cellule j (faisant partie du chemin d'écoulement depuis le pixel k jusqu'au puits) : facteur cultural du pixel j .
S_j	[m.m ⁻¹]	Facteur de pente de la cellule j (faisant partie du chemin d'écoulement depuis le pixel k jusqu'au puits).

Voici une liste des différentes particularités de ce nouvel indicateur :

- La structure générale du modèle de Borselli est gardée, dans le but de continuer à considérer la redéposition des sédiments.
- Nous avons décidé de considérer le facteur C de la méthode USLE comme facteur de pondération. Nous faisons donc l'hypothèse que ce facteur peut être considéré au dénominateur comme une « rugosité hydraulique normalisée » (0-1). Le facteur C est en effet basé entre autre sur la rugosité du sol et la couverture du sol (qui reflète la densité végétale et la présence de résidus de culture). Au numérateur, ce facteur intervient plus comme un indice représentant le potentiel de production de sédiments. Le facteur C a l'avantage d'être une donnée accessible.
Notons ici que nous allons nous placer dans une position de « pire scénario » au niveau des parcelles agricoles. En effet, pour ce type d'occupation du sol, nous ne ferons la distinction qu'entre les prairies permanentes (facteur C très faible) et les terres arables, que nous considérerons comme « sol nu » (valeur maximale du facteur C). Les autres types d'occupations du sol sont les territoires artificialisés, les forêts permanentes, les zones humides, et les surfaces en eau.
Nous avons utilisé le même facteur de pondération pour l'indicateur de Borselli original et RUSLE. Les valeurs que prennent ce facteur en fonction de l'occupation du sol et en fonction de l'indice sont présentées au Tableau 23.
- Nous remplaçons le facteur $S \times \sqrt{A_k}$ de Borselli par le facteur de pente LS défini selon Desmet & Govers (1996). Le numérateur de l'indice modifié correspond donc à la perte en terre totale en amont du pixel k .
- En ce qui concerne le facteur de pente, nous allons considérer un seuil minimal de 0.005 m.m⁻¹, et un seuil maximal de 1 m.m⁻¹. Cette démarche permet d'éviter les valeurs infinies que prend l'indicateur en cas de pente nulle (seuil min.), et de corriger l'érosion sur les

pentres supérieures au seuil max. (falaises). Il s'agit des mêmes seuils utilisés par Cavalli et al. (2013).

La même démarche a été appliquée pour l'indicateur de Borselli original.

- La pluie de projet utilisée dans ce cas-ci correspond à celle décrite dans le rapport de la convention ELIPSOL (Cordonnier et Bièdres, 2008). Son érosivité prend une valeur constante de 233 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹. Cette érosivité a été utilisée pour l'ensemble des trois indicateurs présentés.

Le Tableau 23 présente les valeurs de facteur cultural utilisées en fonction de l'occupation du sol. Pour les pixels répertoriés comme territoire artificialisé, nous avons décidé de différencier la valeur prise par le facteur au composant amont de celle au composant aval. En effet, dans l'indice de Borselli, ce facteur intervient au composant amont dans un contexte de production de sédiments, tandis qu'il intervient dans un contexte de rugosité hydraulique au composant aval.

Tableau 23 : VALEURS DU FACTEUR CULTURAL EN FONCTION DE L'OCCUPATION DU SOL

Type d'occupation du sol	Valeur du facteur C	
	C _i (composant amont et RUSLE)	C _j (composant aval)
Terrains agricoles (considérés comme sols nus dans le contexte du pire scénario)	1	1
Territoires artificialisé	10 ⁻⁷	1
Forêts permanentes	0.001	0.001
Zones humides	0.01	0.01
Surfaces en eau	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
Prairies permanentes	0.01	0.01

✓ *Protocole expérimental*

Nous allons, dans cette section, présenter les grandes étapes de la démarche suivie pour quantifier l'aléa d'inondation boueuse pour un récepteur donné.

La Figure 54 montre le schéma général du protocole expérimental employé, que nous allons présenter étape par étape.

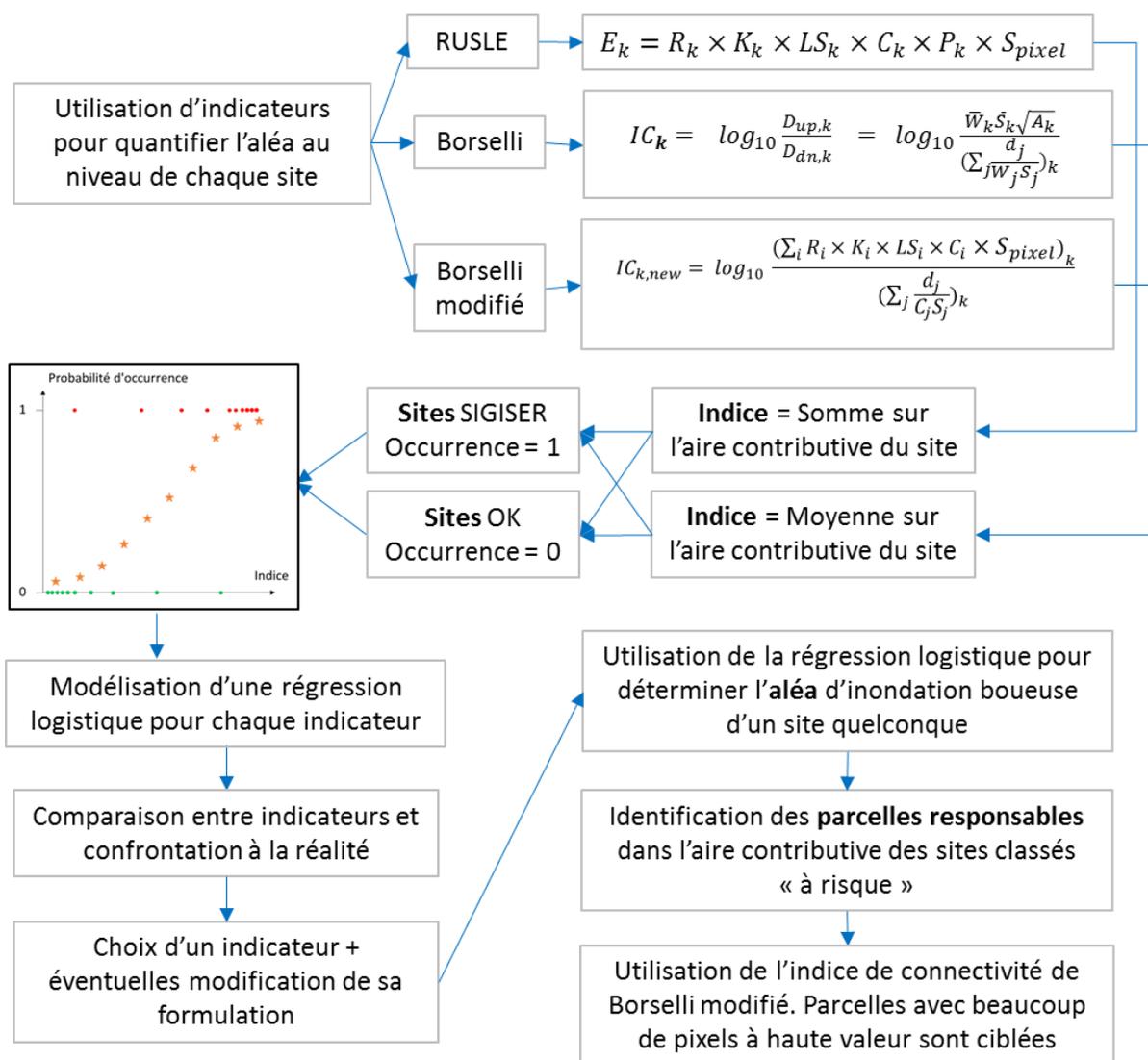


Figure 54 : "FLOWCHART" DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL POUR LA DÉTERMINATION DE L'ALÉA D'INONDATION BOUEUSE EN UN SITE QUELCONQUE

I. Démarche pairée : Recherche d'un site « OK » homologue à chaque SIGISER

Avant de lancer le calcul des indicateurs sur les sites, la première étape consiste en la recherche, pour chacun des SIGISER répertoriés dans la base de données GISER, d'un site « OK » qui leur est homologue. Un site « OK » est défini comme étant un site pour lequel aucun événement d'inondation boueuse n'a encore été répertorié par le passé.

Nous ne choisissons pas les sites « non-touchés » au hasard :

- Le site « OK » doit posséder une aire contributive du même ordre de grandeur que son SIGISER homologue (tolérance de 5 %).
- L'exutoire du site « OK » doit posséder une proportion d'au moins 30 % de territoire artificialisé (considéré comme récepteur de risques) dans une zone tampon circulaire de 30 mètres de rayon autour de lui. Ce seuil a été choisi arbitrairement, afin de nous assurer que le site « OK » soit à proximité d'une quantité suffisante de récepteurs de risque, sans pour autant être trop contraignant pour la sélection du site. La Figure 55

représente la distribution de la proportion de récepteurs de risque dans la zone tampon de 30 mètres autour du centroïde de chaque zone de dégâts répertoriée dans la base de données GISER. Notons, que la proportion moyenne observée est de 69 %.

- Pour chaque SIGISER, nous chercherons un site « OK » homologue le plus proche possible de celui-ci. Ce critère nous permet d'augmenter la probabilité que les deux sites homologues aient connu les mêmes conditions climatiques lorsque le SIGISER a connu une ou plusieurs inondations boueuses. Pour chaque SIGISER, nous recherchons donc des candidats de sites « OK » qui leur sont homologues et qui respectent les deux premiers critères cités ci-dessus. Cette recherche commence dans un rayon de 500 mètres autour du SIGISER. Si aucun candidat n'est trouvé, nous réitérons la recherche dans un rayon croissant par pas de 500 mètres supplémentaires. Une limite maximale est cependant fixée à 5000 mètres.

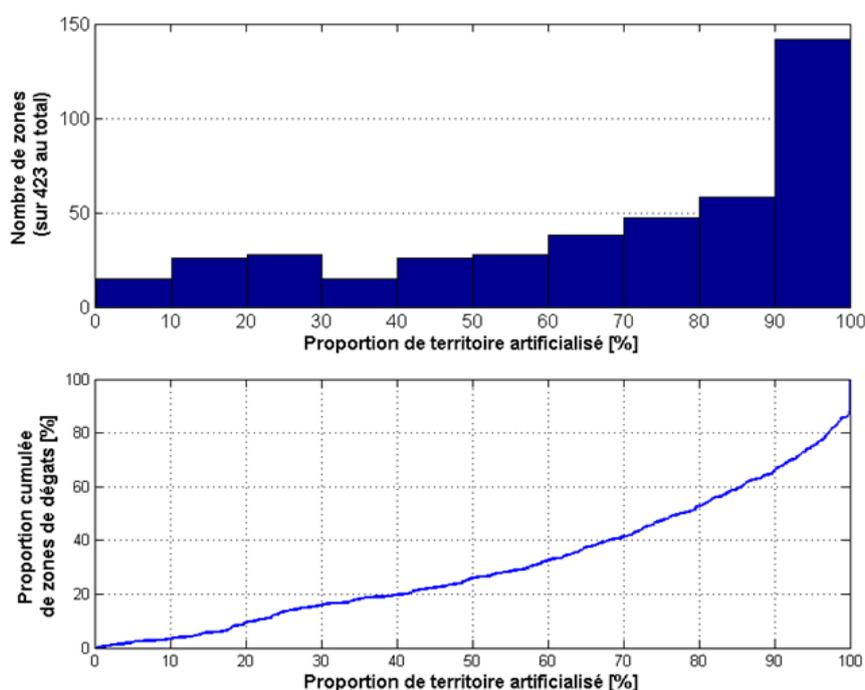


Figure 55 : NOMBRE (A) ET PROPORTION CUMULÉE (B) DE ZONES DE DÉGATS (PROPRES AUX SIGISER) PAR CLASSES DE PROPORTION DE TERRITOIRE ARTIFICIALISÉ DANS UN BUFFER DE 30M AUTOUR DE LEUR CENTROÏDE

II. Calcul des trois différents indicateurs

Sur chacun des SIGISER, ainsi que leur site « OK » homologue, nous prévoyons de calculer les trois différents indicateurs qui ont été présentés ci-dessus (RUSLE, Borselli, et Borselli modifié) sur l'aire contributive étudiée. Nous obtiendrons en chaque pixel de cette aire contributive une valeur pour chaque indicateur.

III. Calcul d'un indice global pour l'aire contributive

L'étape suivante consiste à déterminer, à partir des valeurs d'indicateurs en chaque pixel, un indice général pour l'ensemble de l'aire contributive du site étudié. Nous utilisons la somme de l'érosion (en tonnes) en chaque pixel calculée par la méthode RUSLE, tandis que

nous calculons la valeur moyenne des indicateurs en chaque pixel de l'aire contributive pour les deux autres indices.

IV. Analyse exploratoire des résultats et retrait de sites particuliers

Grâce à l'enregistrement de certaines statistiques ou autres résultats intermédiaires lors des étapes précédentes, nous pouvons procéder à une analyse exploratoire des résultats obtenus. Le but de celle-ci est de comprendre, de manière intégrée, les résultats bruts obtenus, ainsi que les interactions entre les différents indices enregistrés en chaque site.

Suite à cette analyse, nous pouvons tester l'application de filtres sur les critères de sélection des sites homologues. Par exemple, nous pouvons restreindre l'analyse aux paires dont la proximité est inférieure à 500 mètres uniquement, ou aux SIGISER dont l'aire contributive déterminée sur base du MNT (10 mètres de résolution) est proche de celle dessinée par l'expert GISER sur base de sa connaissance du terrain. Cette démarche a pour but d'évaluer l'impact de ces critères sur la qualité de la relation entre indice et aléa.

V. Courbe de calibration des indices

Afin de trouver la relation liant la valeur des indices en un site et l'aléa d'inondation boueuse en ce site, nous utilisons les résultats d'indices pour les sites SIGISER et leur homologue non-SIGISER. Nous comparons ainsi les indices sur les SIGISER, sites connus pour avoir été affectés par des inondations boueuses, et sur les sites « OK », a priori non touchés.

Nous attribuons ensuite pour les sites ayant déjà connu des épisodes d'inondations boueuses une valeur de probabilité d'occurrence (aléa d'inondation boueuse) de 1. Après détermination des indices, nous pouvons placer un point sur un graphique tel que présenté à la Figure 56 (points rouges). Si l'indice est pertinent, nous attendons ici à observer des valeurs d'indice élevées.

De la même manière, nous attribuons une valeur de probabilité d'occurrence de 0 pour les sites « OK ». À nouveau, nous pouvons placer pour chaque site « OK » étudié un point sur le graphique tel que présenté à la Figure 56 (points verts). Nous nous attendons ici à observer des valeurs d'indice faibles.

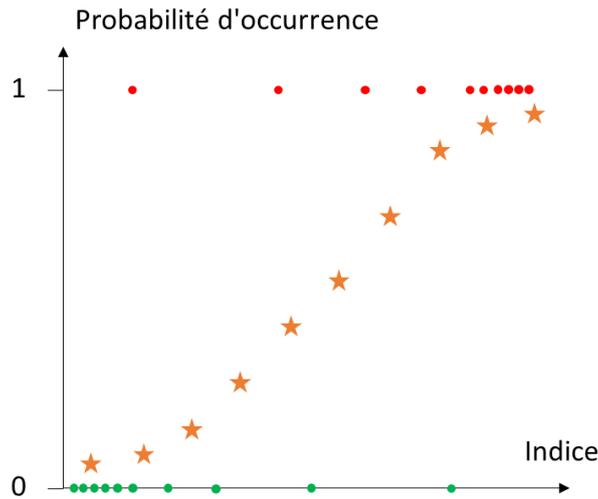


Figure 56 : RELATION ALÉA VS. VALEUR D'INDICE

L'étape finale pour construire la relation aléa – valeur d'indice est d'utiliser les deux classes de points trouvés pour déterminer, via une régression logistique, la relation liant la valeur de l'indice (quantitative) à la probabilité d'occurrence (binaire).

Pour autant que suffisamment de points soient disponibles et que ceux-ci soient suffisamment bien répartis sur la gamme de valeurs que peut prendre l'indice, le logiciel « R » © peut être utilisé pour construire la relation, par régression logistique (Équation 17), via l'estimation des coefficients α et β (Preux et al., 2005).

Plusieurs relations sont déterminées : une pour chaque indice, mais aussi en fonction de divers facteurs tels que présentés au Tableau 24.

$$p = \frac{1}{1 + e^{(\alpha + \beta X)}} \quad (17)$$

Avec :

- p** [-] La probabilité d'occurrence (variable à expliquer, qualitative et binaire)
- α** [-] Coefficient estimé par le logiciel R (« intercept »)
- β** [-] Coefficient estimé par le logiciel R
- X** [-] La variable explicative (quantitative)

Notons qu'il est possible d'effectuer une régression multiple, avec plusieurs variables explicatives. Cette extension est formulée à l'équation 18.

$$p = \frac{1}{1 + e^{(\alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i)}} \quad (18)$$

Avec X_i la variable i parmi les n variables explicatives. Chaque variable explicative possède alors son propre coefficient β (Preux et al., 2005).

Afin de juger de la qualité des régressions logistiques construites, le logiciel « R » © nous fournit le « AIC » (Akaike information criterion) de la régression. Ce critère permet de comparer la qualité

✓ État d'avancement et résultats

Le protocole expérimental décrit plus haut a été appliqué dans un premier temps pour l'un des trois indicateurs proposés : l'indice de connectivité de Borselli modifié. Nous avons choisi d'implémenter en priorité cet indicateur pour en observer les résultats qu'il génère, et éventuellement modifier sa formulation en conséquence.

L'implémentation du protocole expérimental a nécessité la rédaction d'un script informatique utilisant le langage « Python ». En effet, le modèle mis en place étant spatialement distribué, « Python » s'est naturellement avéré être le langage idéal, puisque compatible avec le logiciel de traitement de données cartographiques « ArcGIS – ESRI © ». La formulation des indicateurs RUSLE et Borselli original étant en partie reprise dans l'indicateur de Borselli modifié, il a été aisé de rédiger les scripts à exécuter pour générer les résultats pour ces deux autres indicateurs.

L'utilisation du script a permis d'automatiser l'ensemble des opérations à effectuer dans ArcGIS pour obtenir les résultats souhaités. L'exécution du script nous permet ainsi de lancer la recherche d'un site « OK » homologue pour chaque SIGISER, et ensuite de calculer les indices à la fois sur l'aire contributive du SIGISER et leur site « OK » homologue. Dans le code est incluse une « boucle » permettant d'exécuter les opérations sur chaque SIGISER un par un.

IV. Analyse exploratoire des résultats

Tout au long de l'exécution du script, différentes propriétés sont calculées et enregistrées pour chaque SIGISER et site « OK » homologue. Ces caractéristiques, présentées au Tableau 25, nous sont utiles pour l'analyse exploratoire des résultats, ainsi que pour le retrait éventuel (via filtre) de certains sites présentant des propriétés particulières, non représentatives de l'ensemble des SIGISER et sites « OK ».

Tableau 25 : DÉFINITION DES PROPRIÉTÉS ENREGISTRÉES POUR CHAQUE SITE

APPELLATION	DÉFINITION
Shape_area	Surface [ha] de l'aire contributive du SIGISER tel que dessiné dans la base de donnée de GISER. De manière générale, le SIGISER est délimité à l'aide de l'outil « Watershed » (extension <i>Spatial Analyst</i> , ArcGIS). Certaines retouches peuvent cependant avoir été effectuées en fonction de certaines particularités de terrain (routes,...) par les ingénieurs de terrain sur base de leurs connaissances.
AC_SIGISER	Surface [ha] de l'aire contributive du SIGISER construit(e) uniquement à l'aide de l'outil « Watershed », sur le pixel au « flow accumulation » maximal au sein du SIGISER de la base de données GISER (MNT 10m).
AC_DP	Surface [ha] du site « OK » (démarche pairée) construit uniquement à l'aide de l'outil « Watershed », sur les pixels candidats ayant été retenus.
Rap_ACSIG1	Proportion de l'aire contributive dessinée grâce à l'outil « Watershed » sur le pixel au flow accumulation maximal dans le SIGISER de la base de données GISER, qui est incluse elle-même dans la forme du SIGISER tel que cartographié dans la base de données GISER. Ce rapport nous permet de quantifier les différences entre ces deux représentations du

SIGISER, et peut prendre une valeur allant de 0 à 1. La Figure 57 donne une explication imagée de cet indice.

Rap_ACSIG2	Proportion du SIGISER cartographié dans la base de données GISER incluse dans l'aire contributive du SIGISER dessinée grâce à l'outil « Watershed » sur le pixel au flow accumulation maximal dans le SIGISER de la base de données GISER. La Figure 57 donne une explication imagée de cet indice.
Rap_SIG_DP	Proportion de l'aire contributive du site « OK » occupée par d'autres SIGISER. Il peut en effet arriver que le site « OK » englobe un (ou plusieurs) SIGISER.
Dist_AC	Distance [m] entre le centroïde de l'aire contributive du site « OK » trouvé et celui de l'aire contributive de son SIGISER homologue. Au plus la distance entre ces deux sites est petite, au plus nous pouvons nous attendre à ce que les mêmes conditions météorologiques s'appliquent aux deux sites homologues.
Dist_zones	Distance [m] entre le centroïde de la zone de dégâts du site « OK » (son exutoire) et l'exutoire de son SIGISER homologue.
Dist_infra	Distance [m] entre l'exutoire du site « OK » et les récepteurs de risque potentiels les plus proches. Au plus cette distance est petite, au plus il est probable que, si une inondation boueuse devait s'y produire, elle soit signalée par les propriétaires des récepteurs de risque. Cet indice ne peut dépasser la valeur de 30 mètres (contrainte imposée).
Prop_infra	Proportion [%] de récepteurs de risque potentiels dans la zone tampon de 30 mètres de rayon autour de l'exutoire du site « OK ». (Valeur minimale fixée à 30 %)
Slope_SIG et Slope_DP	Pente moyenne dans le SIGISER et dans le site « OK » [$m.m^{-1}$]
Gravel_SIG et Gravel_DP	Indice de Gravelius du SIGISER et du site « OK » (voir équation 20)
Artif_SIG et Artif_DP	Proportion [%] de territoire artificialisé dans l'aire contributive des 2 sites homologues
Agric_SIG et Agric_DP	Proportion [%] de terrains agricoles dans l'aire contributive des 2 sites homologues
Foret_SIG et Foret_DP	Proportion [%] de forêts dans l'aire contributive des 2 sites homologues
Humid_SIG et Humid_DP	Proportion [%] de territoire répertorié comme « zones humides » dans l'aire contributive des 2 sites homologues
Eau_SIG et Eau_DP	Proportion [%] de surface en eau dans l'aire contributive des 2 sites homologues
Prair_SIG et Prair_DP	Proportion [%] de prairies dans l'aire contributive des 2 sites homologues
Rmean_SIG et Rmean_DP	Valeur moyenne du facteur R des deux sites homologues [$(MJ.mm).(ha.h)^{-1}$]
Kmean_SIG et Kmean_DP	Valeur moyenne du facteur K des deux sites homologues [$(T.h).(mm.MJ)^{-1}$]
Cmean_SIG et	Valeur moyenne du facteur C des deux sites homologues [-]

Cmean_DP
LSmean_SIG et
LSmean_DP

Valeur moyenne du facteur LS des deux sites homologues [-]

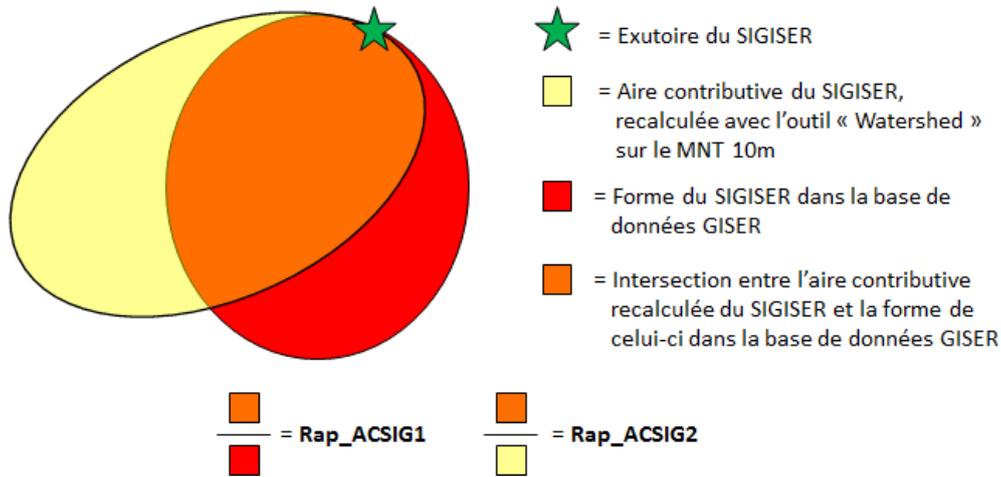


Figure 57: DÉFINITION IMAGÉE DES INDICES **RAP_ACSIG1** ET **RAP_ACSIG2**

La Figure 57 nous permet de mieux nous représenter les indices « Rap_ACSIG1 » et « Rap_ACSIG2 ».

Afin de rester scientifiquement cohérent lors de la recherche du site « OK », homologue au SIGISER, nous devons utiliser la même méthode de délimitation pour ces deux types de sites, à savoir l'outil « Watershed ». Or, les SIGISER tels que dessinés dans la base de données GISER ont été cartographiés non seulement avec cet outil, mais également via des modifications manuelles (non-automatisables) grâce aux connaissances de terrain de la cellule GISER. Plusieurs raisons peuvent justifier une modification manuelle de la forme des SIGISER :

- Croisement avec un aménagement de terrain (axe routier ou chemin de fer par exemple) qui capte les flux en amont de celui-ci. La résolution du MNT ne permet pas toujours d'en tenir compte. Dans ce cas, l'aire contributive s'arrête au niveau de cet aménagement, et la forme du SIGISER doit être adaptée manuellement.
- Dans le cas où la zone de dégâts observée correspond à un aménagement s'étendant sur plusieurs dizaines de mètres : fusion de plusieurs aires contributives dont l'exutoire arrive sur cet aménagement.
- Disponibilité des données : croisement des axes de ruissellement avec des frontières telles que Wallonie-Flandres ou Wallonie-France. Des modifications manuelles sont alors nécessaires.

Les indices « Rap_ACSIG1 » et « Rap_ACSIG2 » renseignent ainsi sur la similitude (ou dissimilitude) entre la forme de l'aire contributive du SIGISER telle que dessinée dans la base de données GISER et la forme de l'aire contributive du SIGISER calculée simplement via l'outil « Watershed ».

L'indice de Gravelius (>1), repris dans les indices « Gravel_SIG » et « Gravel_DP » au Tableau 25, est défini comme étant le rapport entre le périmètre du polygone représentant un site d'une surface A, et le périmètre d'un cercle hypothétique possédant la même surface (Équation 20) (Bendjoudi et al. 2002). Il s'agit d'un indice de compacité de bassins versants, qui tend vers 1

pour un bassin versant circulaire. Plus l'indice est élevé, plus le temps de concentration sera long.

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (20)$$

Avec :

- K** [-] L'indice de Gravelius (>1)
- P** [m] La longueur du périmètre du site (bassin versant)
- A** [m²] La surface du site (bassin versant)

Dans l'analyse exploratoire, nous avons étudié la distribution des valeurs que prenaient l'ensemble des facteurs présentés au Tableau 25 en chaque site. Les figures générées lors de l'analyse exploratoire sont présentes en annexe : Figure 64, Figure 65, Figure 66, Figure 67, Figure 68, Figure 69, Figure 70, Figure 71, Figure 72, Figure 73, et Figure 74.

Le Tableau 26 présente la moyenne, les valeurs minimales et maximales, ainsi que l'écart type des différentes caractéristiques des sites enregistrées.

Tableau 26 : STATISTIQUES SUR LA DISTRIBUTION DES VALEURS DES PROPRIÉTÉS ENREGISTRÉES

Caractéristiques (abrég. : voir définitions au Tableau 25)		SIGISER				Sites « OK »			
		Moy.	Min.	Max.	Écart- type	Moy.	Min.	Max.	Écart- type
Surface des sites [ha]	Shape_area	37.3	0.3	77.0	69.0	Pas applicable			
	Aires cont. « Watershed »	41.4	0.2	1747	118	42.9	0.2	1818	1218
Rapports [/]	Rap_ACSIG 1	0.64	0.01	1	0.34	Pas applicable			
	Rap_ACSIG 2	0.87	0.01	1	0.25				
	Rap_SIG_DP		Non disponible			0.05	0	0.91	0.16
Distances [m]	Dist_AC	1348	74	7326	1250	Voir colonne SIGISER			
	Dist_zones	1377	42	7245	1321	Voir colonne SIGISER			
	Dist_infra		Non calculé			0.05	0	5.67	0.45
	Prop_infra [%] (buffer 30m exutoire)		Non calculé			79	30	100	23
	Pente [m.m⁻¹]	0.05	0.01	0.17	0.02	0.05	0.01	0.33	0.04
	Ind. de Gravelius [/]	1.58	1.08	5.79	0.58	1.58	1.08	6.29	0.55
Occupation du sol [%]	Territoire artificialisé	11.6	0	91	14.1	36.3	0.98	100	28.4
	Terrains agricoles	76.5	0	100	22.9	49.5	0	98.8	29.3
	Forêts	2.8	0	100	9.7	3.9	0	67.7	10.1
	Zones humides	0.02	0	8.4	0.4	0.02	0	5.5	0.3
	Surfaces en eau	0.1	0	12.4	0.8	0.2	0	7.7	0.8
	Prairies	9.0	0	100	14.9	10.2	0	83.8	15.3
Facteurs	$R [(MJ.mm).(ha.h)^{-1}]$	233	233	233	0	233	233	233	0
	$K [(T.h).(mm.MJ)^{-1}]$	49.6	28.7	51.0	2.71	49.1	28.8	51.0	3.4
	$C [-]$	0.77	0.00	1.00	0.23	0.49	0.00	0.99	0.29
	$LS [-]$	1.61	0.26	13.65	1.42	2.64	0.13	63.0 0	5.40

V. Résultats

Suivant les critères de sélection de sites « OK » présentés plus haut, aucun candidat de site « OK » homologue n'a été retenu pour 11 SIGISER parmi les 453 de la base de données GISER.

Le Tableau 27 présente des statistiques sur les résultats obtenus suite à l'exécution des scripts pour les trois indices définis dans le protocole expérimental.

Tableau 27 : STATISTIQUES SUR LES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES TROIS DIFFÉRENTS INDICES

Indices (voir protocole expérimental)	SIGISER				Sites « OK »				
	Moy.	Min.	Max.	Écart -type	Moy.	Min.	Max.	Écart -type	
RUSLE [10 ^x T]	5.61	1.05	7.26	6.05	5.55	0.00	7.34	6.11	
Indice de Borselli	IC	-6.16	-16.72	-2.86	1.78	-7.29	-15.46	-3.43	2.20
	D_down	4.8	1.9	11.4	1.4	4.92	1.44	11.61	1.68
	D_up	-1.36	-6.23	-0.48	0.76	-2.37	-8.18	-0.62	1.71
Indice de Borselli modifié	IC	-2.6	-13.2	0.3	1.8	-3.8	-12.0	-0.1	2.2
	D_down	4.8	1.9	11.4	1.4	4.9	1.44	11.6	-0.1
	D_up	2.2	-3.0	3.4	0.8	1.1	-5.0	3.2	1.8

Grâce au logiciel « R », nous avons construit des régressions logistiques entre différents indices et l'aléa d'inondation boueuse. Nous avons veillé ici à ce que le même nombre de sites (même échantillon) soit utilisé pour chacune des régressions effectuées, afin de pouvoir comparer leur qualité par le « AIC ».

La Figure 58 présente la régression logistique effectuée sur la production de sédiments par site, calculée via RUSLE (équation 14). La courbe en trait plein représente la régression logistique dans la gamme de valeurs observées de production estimée par RUSLE.

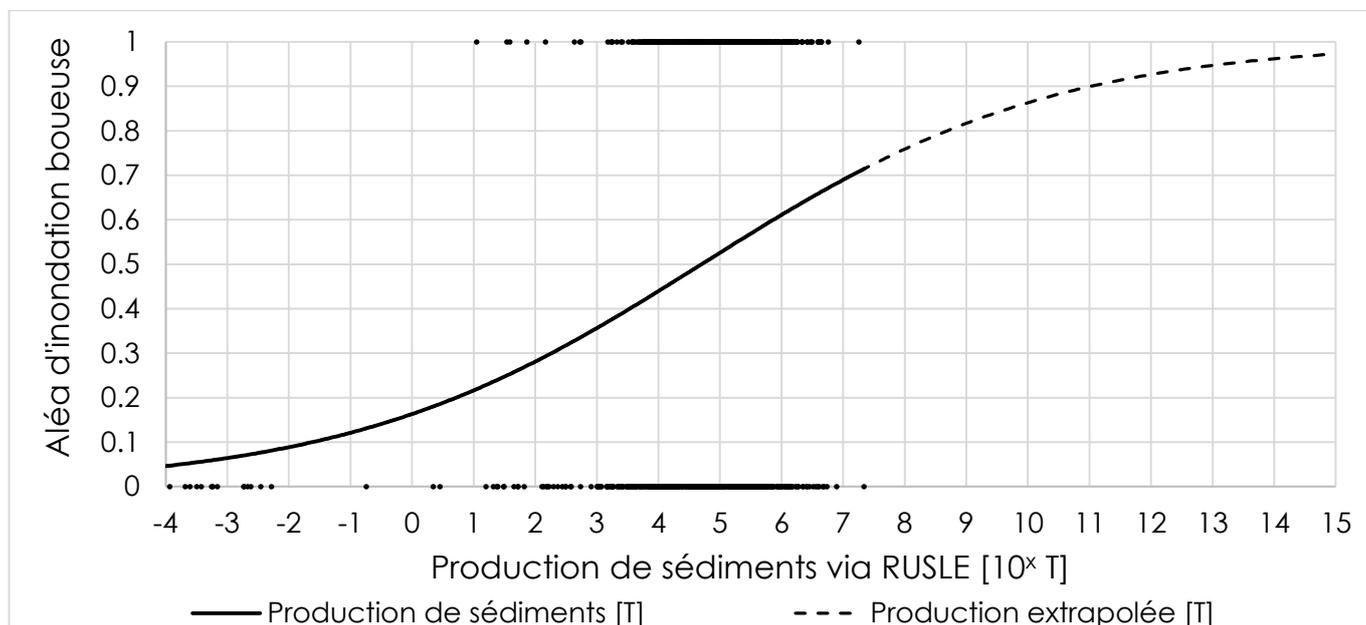


Figure 58 : RÉGRESSION LOGISTIQUE SUR LA PRODUCTION DE SÉDIMENTS (RUSLE)

Nous voyons sur cette figure, que l'aléa d'inondation boueuse estimé par la régression logistique augmente de manière très progressive avec la production de sédiments calculée par la méthode RUSLE. De plus, pour la gamme de valeurs de production de sédiments observée en nos sites, l'aléa prédit ne s'élève pas au-dessus de 0.72.

La Figure 59 présente les régressions effectuées sur l'indice de Borselli à la fois original (équation 15) et modifié (équation 16), ainsi que sur le logarithme de leurs composants amont et aval.

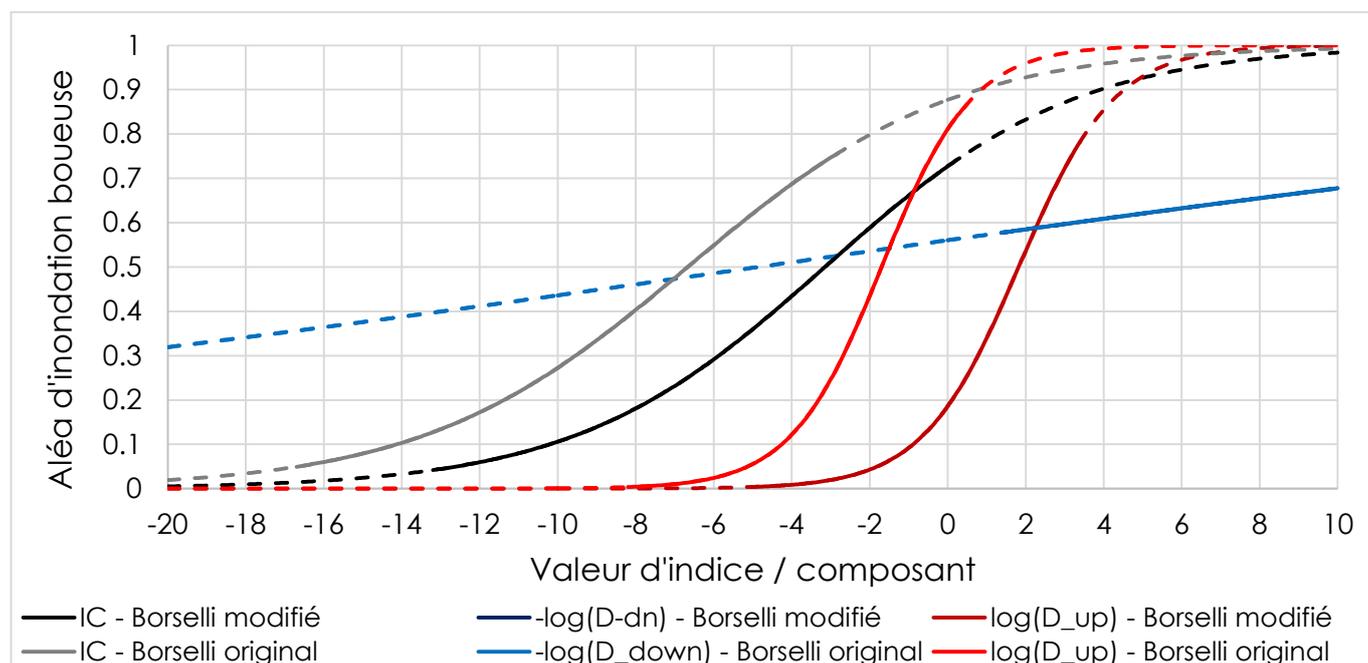


Figure 59 : RÉGRESSIONS LOGISTIQUES SUR LES INDICES DE BORSELLI ORIGINAL ET MODIFIÉ, ET LES COMPOSANTES AMONT (UP) ET AVAL (DOWN) DE CES INDICES. LES COMPOSANTES AVAL DE BORSELLI ET BORSELLI MODIFIÉ SONT IDENTIQUES

De manière qualitative, nous pouvons voir sur cette figure que, pour les deux indices, le composant amont présente une régression de bien meilleure qualité que le composant aval (identique pour les deux indices). Par conséquent, les régressions sur les indices globaux sont également moins bonnes que celles des composants amont (Tableau 29). Au niveau de la comparaison entre indicateurs de Borselli original et modifié, nous pouvons observer sur cette figure un décalage au niveau des courbes (« intercept » α), mais des pentes similaires (coefficient β) (Équation 17).

Des régressions logistiques ont également été effectuées sur des facteurs simples, tels que l'occupation du sol (Figure 60 et Tableau 29).

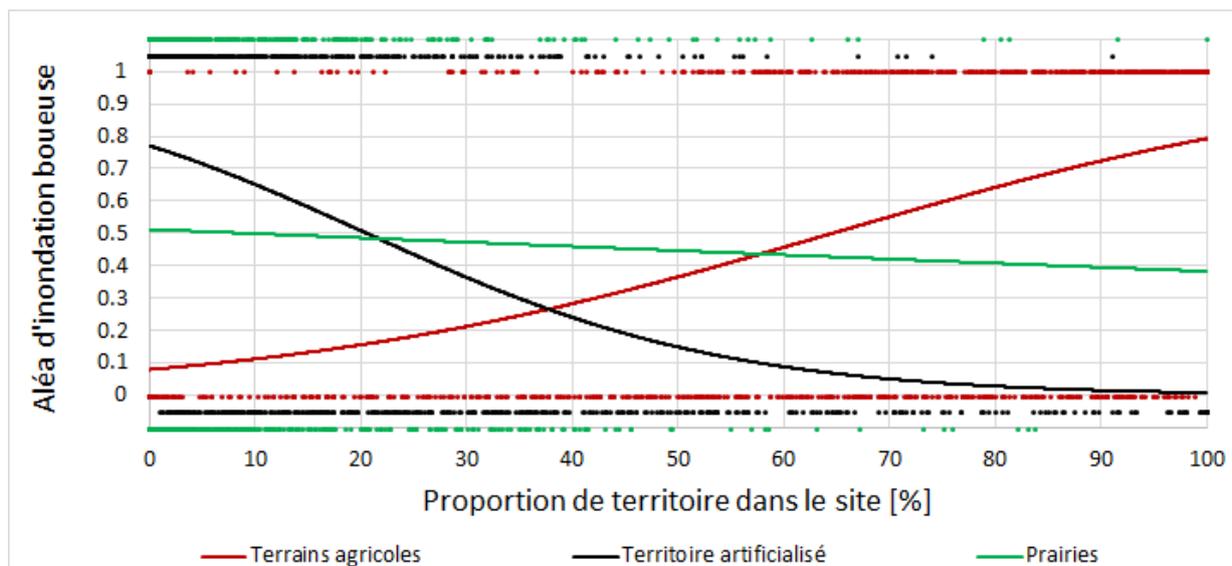


Figure 60 : RÉGRESSIONS LOGISTIQUES SUR L'OCCUPATION DU SOL AU SEIN DES SITES

Cette figure nous montre qu'il existe des relations très claires entre l'occupation du sol et l'aléa d'inondation boueuse, en particulier pour la proportion de territoire artificialisé (relation inversement proportionnelle) et de terrains agricoles (relation proportionnelle). Bien que nous nous attendions à une relation inverse forte entre la proportion de terrain occupé par les prairies et la probabilité d'occurrence d'inondation boueuse (facteur C faible), celle-ci semble négligeable. Ceci est probablement dû au fait que, de manière générale, il s'agit d'un type d'occupation du sol assez peu représenté autant au sein des sites SIGISER que des sites « OK » (voir Tableau 26, ou encore points verts sur la Figure 60).

Nous pouvons ensuite observer les résultats de régression pour les facteurs de pente moyenne des sites (Figure 61) et de l'indice de Gravelius (Figure 62) qui leur est associé.

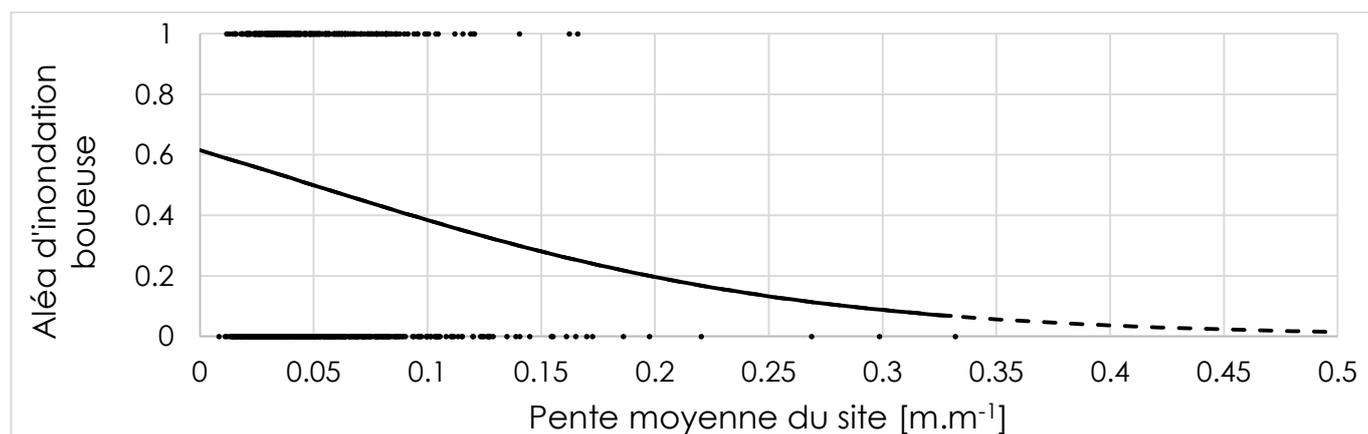


Figure 61 : RÉGRESSION LOGISTIQUE SUR LA PENTE MOYENNE DES SITES

Nous nous attendions ici à ce que l'aléa d'inondation boueuse augmente avec la pente moyenne des sites. En effet, avec une pente croissante, nous nous attendons à une augmentation de la production de sédiments et à une diminution de redéposition de ceux-ci. Nous observons ici une tendance inverse. Ceci peut s'expliquer par le fait que la pente soit négativement corrélée à la proportion de terrains agricoles et positivement corrélée à la

proportion de territoire artificialisé et de prairies (Tableau 28). Donc, les sites plus pentus sont moins cultivés, et donc produisent moins de sédiments.

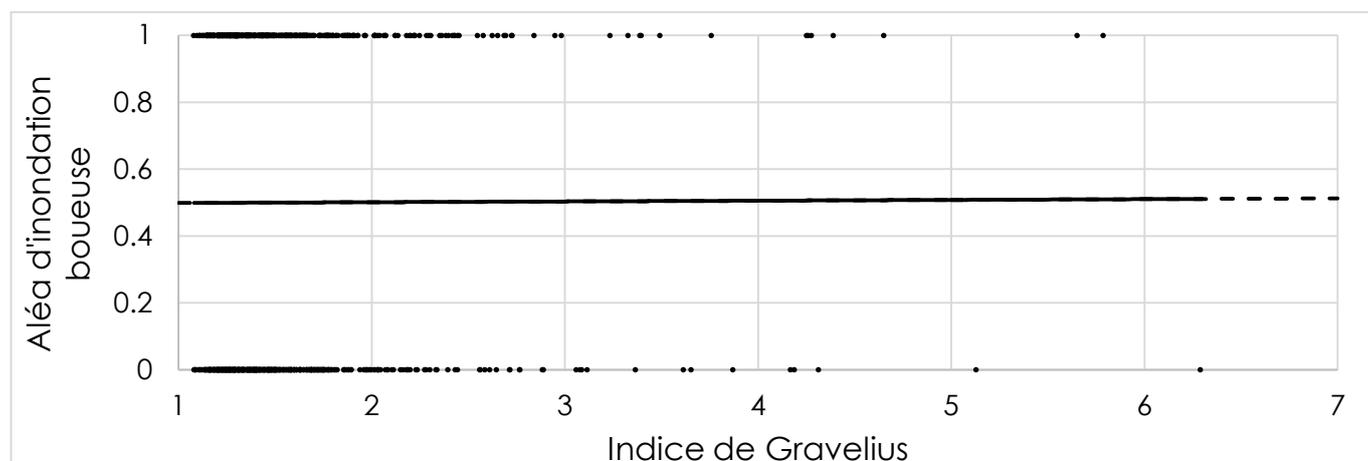


Figure 62 : RÉGRESSION LOGISTIQUE SUR L'INDICE DE GRAVELIUS DES SITES

Cette figure nous montre que l'indice de Gravelius, qui reflète la forme des sites (bassins versants) ne semble pas corrélé à l'aléa d'inondation boueuse. La démarche pairée pour la sélection des sites « OK », en imposant des surfaces d'aires contributives semblables entre sites homologues, peut être en partie responsable de cette observation.

Le Tableau 28 reprend la matrice de corrélation de l'ensemble des facteurs utilisés dans les régressions logistiques présentées ci-dessus.

Tableau 28 : MATRICE DE CORRÉLATIONS DES FACTEURS UTILISÉS DANS LES RÉGRESSIONS LOGISTIQUES. Code couleur graduel : rouge (corrélation négative), blanc (corrélation nulle), vert (corrélation positive)

		IC		D_down		D_up		RUSLE	Occup. du sol			Pente moyenne	Gravelius
		Modifié	Original	Modifié	Original	Modifié	Original		Artif.	Agricole	Prairies		
IC	Modifié	1.00	0.99	-0.68	-0.67	0.66	0.74	-0.22	-0.43	0.61	-0.35	-0.01	0.29
	Original		1.00	-0.71	-0.70	0.61	0.71	-0.27	-0.40	0.60	-0.37	-0.02	0.29
D_down	Modifié			1.00	1.00	-0.05	-0.16	0.68	-0.09	-0.13	0.53	-0.03	-0.35
	Original				1.00	-0.05	-0.16	0.68	-0.09	-0.13	0.53	-0.03	-0.35
D_up	Modifié					1.00	0.95	0.32	-0.67	0.74	-0.08	-0.01	0.07
	Original						1.00	0.21	-0.67	0.78	-0.17	0.01	0.09
RUSLE								1.00	-0.24	0.26	0.25	0.11	-0.37
Occup. du sol	Artif.								1.00	-0.79	-0.03	0.27	-0.04
	Agricole									1.00	-0.35	-0.36	0.05

	Prairies					1.00	0.15	-0.15
Pente moyenne							1.00	-0.05
Gravelius								1.00

Plusieurs observations sont à faire sur ce tableau. Sans surprise, nous pouvons déjà observer que les proportions des trois types d'occupation du sol sont inversement corrélées. Nous voyons également que les indices de Borselli original et modifié sont très fortement corrélés. Leur composant aval est d'ailleurs identique. Au niveau de leur lien avec l'occupation du sol dans les sites, nous voyons une corrélation avec la proportion de terrains agricoles au sein des sites, et une corrélation négative avec les deux autres types d'occupation du sol. Nous voyons ensuite que l'indice RUSLE est inversement proportionnel aux deux autres indicateurs, ainsi qu'à la proportion de territoire artificialisé, et est positivement corrélé aux deux autres types d'occupation du sol. Finalement, la pente moyenne et l'indice de Gravelius sont corrélés avec l'occupation du sol et les indices de connectivité, respectivement, mais comme nous l'ont montré la Figure 61 et la Figure 62, il est difficile d'interpréter les résultats obtenus.

Le Tableau 29, quant à lui, résume les caractéristiques de régressions logistiques présentées ci-dessus. Pour rappel, nous pouvons comparer la qualité des différentes régressions via le « AIC », car les régressions ont été réalisées systématiquement sur le même échantillon (les mêmes sites).

Tableau 29 : PARAMÈTRES DES RÉGRESSIONS LOGISTIQUES SIMPLES SUR LES DIFFÉRENTS FACTEURS

Variable explicative (X)	α (intercept)	β	AIC
RUSLE	-3.025	0.348	1 190.8
Borselli original - IC	1.965	0.295	1 160
Borselli original - D_dn	0.243	0.050	1 228.1
Borselli original - D_up	1.456	0.858	1 084.6
Borselli modifié - IC	0.981	0.311	1 153.1
Borselli modifié - D_dn	0.243	0.050	1 228.1
Borselli modifié - D_up	-1.477	0.812	1 083.5
% artificialisé	1.214	-0.059	976.17
% agricole	-2.437	0.038	1 025.7
% prairies	0.051	-0.005	1 228.1
Pente moyenne	0.468	-9.389	1 212.9
Indice de Gravelius	-0.014	0.009	1 229.5

Ce tableau nous permet de juger de la qualité des différentes régressions logistiques. Il apparaît que le pourcentage de surface imperméabilisée est le meilleur indicateur, suivi du pourcentage de terre agricole. Les indices de connectivités sont légèrement meilleurs que RUSLE, l'IC modifié étant lui-même très légèrement meilleur que l'IC de Borselli. Pour l'évaluation du risque, ces indices 'complexes' n'ont donc pas de plus-value évidente par rapport à des indices plus simples liés à l'occupation du sol. Par contre, ils devraient permettre une meilleure identification des zones sources de sédiments.

Dans cette optique, nous avons calculé la régression logistique multiple (équation 18) sur les 7 facteurs montrant un AIC les plus faibles dans le tableau ci-dessus. Bien qu'une régression logistique multiple ne soit pas représentable graphiquement, nous pouvons présenter les paramètres de celle-ci (ligne « GLM », Tableau 30).

Nous avons ensuite utilisé la méthode « step-wise » dans le logiciel R pour déterminer quelle était la combinaison de facteurs la plus optimale, c'est-à-dire retournant un AIC minimal. Deux protocoles peuvent être utilisés dans la méthode « step-wise » : en avant ou en arrière. Le protocole « en avant » teste les combinaisons de paramètres en rajoutant au fur et à mesure et en ne retenant à chaque fois que la combinaison retournant le AIC le plus faible. Le protocole « en arrière » fonctionne de manière inversée : le logiciel débute l'opération avec l'ensemble des paramètres, et les retire un à un jusqu'à obtenir la combinaison optimale. Le logiciel R nous renvoie en résultats l'intercept α et les coefficients β_i des facteurs sélectionnés (X_i) dans la combinaison optimale. Les résultats de ces régressions via méthode step-wise sont présentés au Tableau 30.

Tableau 30 : PARAMÈTRES DES RÉGRESSIONS LOGISTIQUES MULTIPLES

	α	β_i				RUSLE	% territoire artif.	% terrains agricoles	AIC
		Borselli modifié D_up	Borselli original D_up	Borselli modifié IC	Borselli original IC				
GLM	-0.822	2.057	-2.648	-2.120	2.317	0.179	-0.058	0.015	961.1
Step-wise « en arrière »	-0.822	2.057	-2.648	-2.120	2.317	0.179	-0.058	0.015	961.1
Step-wise « en avant »	-0.314		-0.480	0.137			-0.055	0.017	959.6

Ce tableau nous indique que la méthode step-wise retourne des résultats différents en fonction du protocole employé. En effet, alors que le mode « en arrière » n'élimine aucun facteur, celui « en avant » ne garde que les facteurs de type d'occupation du sol (artificialisé et agricole), le composant amont de l'indice de Borselli original, et l'indice de connectivité de Borselli modifié. Nous observons également qu'il s'agit de la régression logistique dont l'AIC est le plus faible.

Pour déterminer l'aléa d'inondation boueuse d'un site quelconque, il nous suffit donc de calculer les différents facteurs repris dans cette régression au sein du site.

VI. Retrait éventuel de sites particuliers

Suite à l'analyse exploratoire des résultats, plusieurs filtres différents ont été testés sur l'ensemble des sites restants, en vue du retrait éventuel de sites non-représentatifs du reste de la distribution. Ces filtres utilisent certains des indices présentés au Tableau 25, en y posant des valeurs seuils à ne pas dépasser. Le Tableau 31 présente les différents filtres ayant été testés sur les résultats de l'ensemble des SIGISER et sites « OK » homologues.

Tableau 31 : DESCRIPTION DES FILTRES UTILISÉS LORS DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE. Les cellules colorées correspondent au nombre de paires de sites respectant le critère (vert : nombre important ; rouge : nombre faible)

Perimetre	max		2 500	2 000	1 500	1 000	500
sites restants		442	407	385	356	292	189
Rap_ACSIG1	min		0.25	0.5	0.75	0.85	
sites restants		442	354	272	212	185	
Rap_ACSIG2	min		0.25	0.5	0.75	0.85	
sites restants		442	413	393	370	358	
Rap_SIG_DP	min		0.5	0.2			
sites restants		442	419	405			
COMBINAISON « out1 »							
sites restants	349	Perimetre	Rap_ACSIG2	Rapport_AC	Rap_SIG_DP		
		2 500	0.25	0.9-1.1	0.5		

Ce tableau nous montre que le critère le plus contraignant en termes de nombre de sites retirés est le rapport Rap_ACSIG1. Cette information nous indique que, pour un nombre considérable (plus de la moitié) de SIGISER, l'aire contributive recalculée avec l'outil « Watershed » sur le pixel au flow accumulation maximal ne correspond pas à la forme du SIGISER telle que dessinée dans la base de données GISER. Dans ce cas, elle a tendance à être plus petite (Rap_ACSIG1 faible). Il peut arriver aussi qu'elles possèdent la même taille, mais soient décalées dans l'espace.

Pour l'ensemble de ces filtres, avec les résultats des sites restants, nous avons construit des régressions logistiques pour déterminer l'aléa d'inondation boueuse en fonction de l'indice de Borselli modifié. Ces régressions logistiques sont présentées en annexe (Figure 75, Figure 76, Figure 77, et Figure 78). L'interprétation de ces figures nous apprend que les filtres n'ont pas un impact positif significatif sur les régressions logistiques, alors que ceux-ci provoquent le retrait d'un nombre considérable de sites. Nous avons, pour cette raison, pris la décision de n'appliquer aucun filtre sur nos données.

Notons que nous avons également testé des valeurs seuils différentes dans le script au niveau de la proportion minimale de récepteurs de risque potentiels dans les 30 mètres autour des candidats de site « OK ». La Figure 63 nous montre l'effet de cette valeur seuil sur la distribution de l'indice « Périmètre ».

	Périmètre	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	SOMME	sur	sites retirés
Proportion	> 30 %	189	103	64	29	22	11	7	3	10	4	442	453	11
	> 50%	166	96	63	41	26	13	13	5	9	5	437	453	16
	> 70 %	147	86	57	52	29	19	13	10	9	4	426	453	27

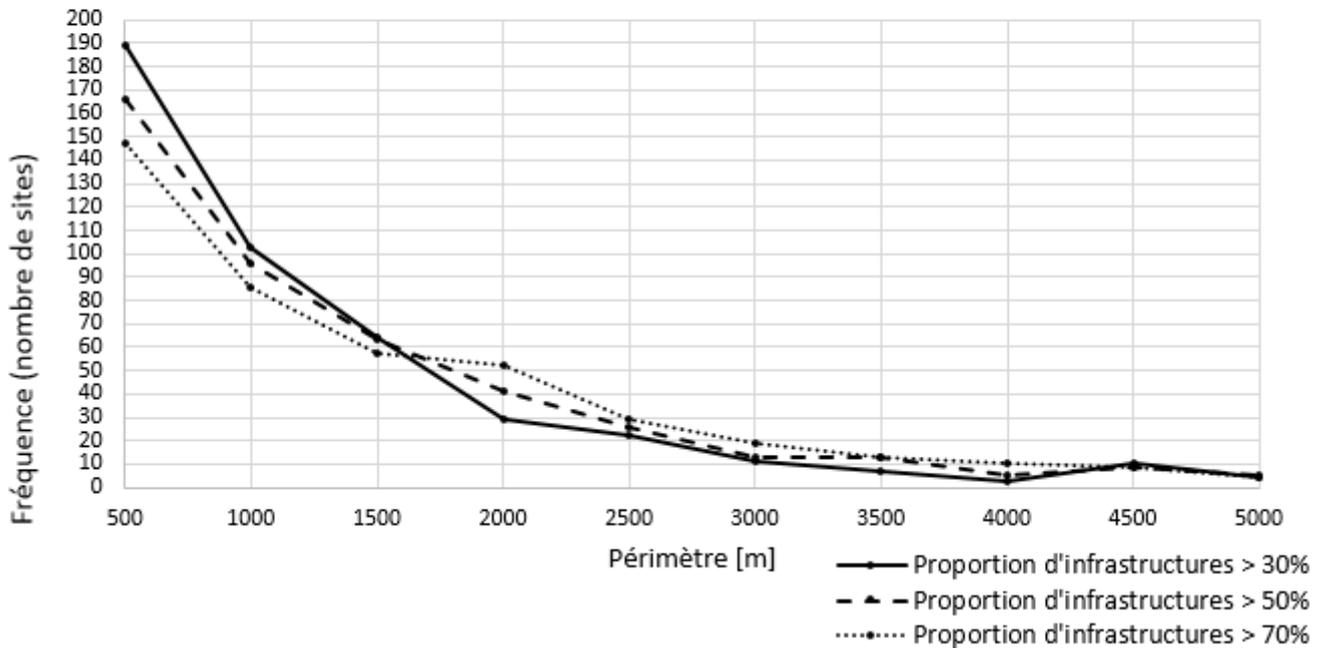


Figure 63 : IMPACT DE LA VALEUR MINIMALE DE PROPORTION DE RÉCEPTEURS DE RISQUE POTENTIEL AUX ENVIRONS DU SITE "OK" SUR LA DISTRIBUTION DE LA DISTANCE ENTRE SIGISER ET SITES « OK » HOMOLOGUES

La comparaison des régressions logistiques en fonction de la valeur seuil sur ce critère n'a pas montré d'impact positif significatif (Figure 79). Nous continuons donc à utiliser ici la valeur seuil initialement posée sur ce critère (minimum 30 %), afin de garder un nombre de sites le plus élevé possible (taille d'échantillon maximale).

6.4.4. Calcul du risque d'inondation boueuse pour chaque récepteur

Une fois la vulnérabilité et l'aléa pour chaque récepteur de risque en Wallonie caractérisés, nous pouvons calculer le risque aux inondations boueuses. Pour ce faire, nous devons poser des valeurs virtuelles de la vulnérabilité des récepteurs de risque en fonction de leur classe. Cela fait, la multiplication de la vulnérabilité avec la probabilité d'occurrence d'une inondation boueuse nous renseignera sur le risque.

L'étape finale pour déterminer si tel ou tel récepteur est à risque en Wallonie est de déterminer subjectivement (en concertation avec le SPW) une valeur seuil de risque, ou une combinaison de valeurs seuils de vulnérabilité et d'aléa au-delà desquelles le récepteur sera considéré comme « à risque ».

6.5. Identification des parcelles responsables des inondations boueuses pour les récepteurs « à risque »

Cette étape consiste à remonter dans l'aire hydrologique contributive des récepteurs considérés comme « à risque », et à identifier les parcelles principalement responsables des sédiments arrivant au niveau des récepteurs de risque en aval.

Pour ce faire, nous reprenons les valeurs d'indice de Borselli (modifié) en chaque pixel inclus dans l'aire contributive du récepteur concerné. Un pixel avec un indice de connectivité élevé sera considéré comme « à risque ». À nouveau, une décision quant à la valeur seuil de l'indice au-delà de laquelle le pixel est considéré à risque devra être prise. Le nombre ou la proportion de pixels « à risque » sur une parcelle sera un indicateur de sa responsabilité par rapport à l'arrivée de sédiments sur les récepteurs de risque en aval lors d'épisodes de pluie intenses.

6.6. Perspectives

Seule une partie du protocole expérimental sur la détermination de l'aléa a été effectuée : l'évaluation du risque d'inondation boueuse en tant que tel ainsi que l'identification des parcelles responsables sont encore à réaliser.

Pour améliorer la précision des régressions, nous pourrions augmenter le nombre de sites analysés afin d'agrandir l'échantillon. Jusqu'ici nous avons maintenu une proportion de 50 % SIGISER et 50 % de sites « OK ». Cette parité n'est pas obligatoire, bien qu'il ne soit pas conseillé de trop s'en éloigner. Dans ce contexte nous pouvons utiliser les SIGISER pour lesquels nous n'avons pas trouvé de site « OK » homologues. Il nous est aussi possible de chercher plusieurs sites « OK » par SIGISER.

Nous pourrions également tester des facteurs supplémentaires dans les régressions logistiques, comme par exemple des indices de caractérisation de bassin versant. Nous pourrions aussi tenir compte de la rugosité hydraulique non pas par l'inverse du facteur cultural dans le composant aval des indices de Borselli, mais bien via un coefficient de Manning réel.

Pour les indices de Borselli, nous avons ici utilisé la moyenne de l'indicateur dans l'aire contributive des cibles. Nous pourrions ici tester si l'utilisation d'autres percentiles comme indice retourne de meilleurs résultats. Une autre possibilité d'indice serait la surface de l'aire contributive possédant une valeur d'indicateur supérieure à un certain seuil arbitraire.

Une perspective supplémentaire dans le domaine étudié ici est celle du passage du MNT de résolution de 10 mètres au MNT LiDAR de résolution de 1 mètre. Cette évolution devrait permettre une amélioration notable du facteur topographique des indicateurs que nous utilisons ici. Ce changement de résolution va être accompagné d'une série d'enjeux. Premièrement, une optimisation des scripts pour éviter un temps d'exécution trop long va être nécessaire.

Aussi, les rasters entrés en input dans le script et dépendants de la topographie devront être

recalculés. Nous pouvons ici citer les rasters de direction de flux, d'accumulation de flux, ou encore les rasters utilisés dans le calcul du facteur LS en chaque pixel.

6.7. Bibliographie

- Bendjoudi, H., Hubert, P., 2002. Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological sciences journal* 47, 921–930.
- Borselli, L., Cassi, P., Torri, D., 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA* 75, 268–277.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* 188, 31–41.
- Cordonnier, H., 2008. Convention ELIPSOL - Rapport final - État des lieux de la protection des sols agricoles en Région Wallonne. SPW.
- Desmet, P.J.J., Govers, G., 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51, 427–433.
- Faraway, J.J., 2005. *Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models*. CRC press.
- GISER, 2015. Détermination des parcelles à risque d'érosion hydrique.
- Kinnell, P.I.A., 2010. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology* 385, 384–397.
- Preux, P.M., Odermatt, P., Perna, A., Marin, B., Vergnenègre, A., 2005. Qu'est-ce qu'une régression logistique? 159–162.
- SPW, 2008. Cartographie du risque de dommages dû aux inondations par débordement de cours d'eau : Annexe – Notice méthodologique et explicative.
- Te Chow, V., 1959. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill International Book Company.
- USDA, 2008. *Revised Universal Soil Loss Equation Version 2*. USDA-Agricultural Research Service Washington, D.C.
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., Roberts, A.M., 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology* 138, 74–88.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*. Agriculture Handbooks (USA), No. 537 62 pp.

6.8. Annexes

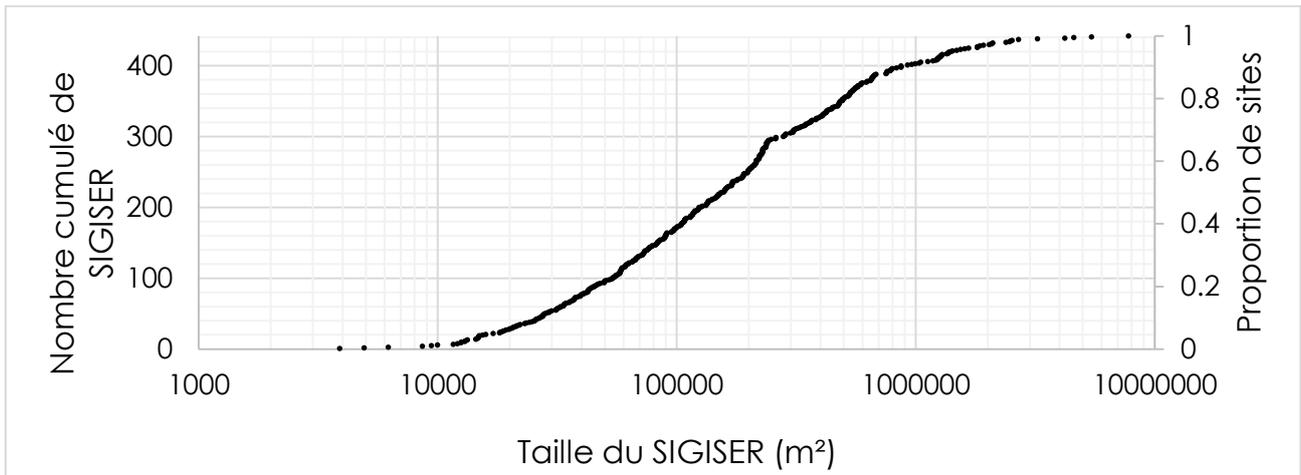


Figure 64 : DISTRIBUTION DES VALEURS DE SURFACE DES SIGISER TELS QUE CARTOGRAPHIÉS DANS LA BASE DE DONNÉES GISER (INDICE « SHAPE_AREA »)

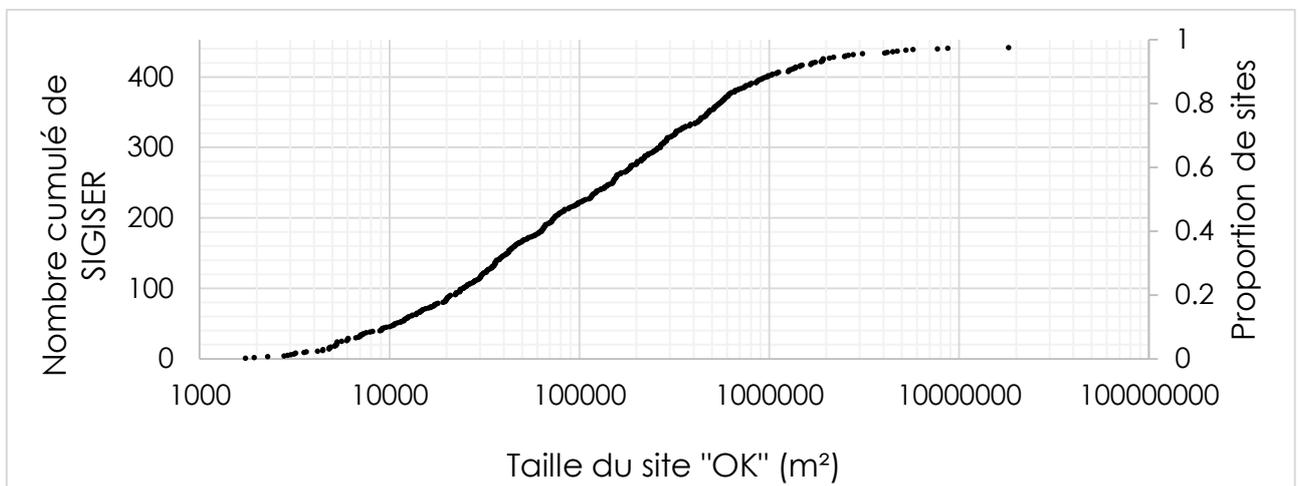


Figure 65 : DISTRIBUTION DES VALEURS DE SURFACE DE L'AIRE CONTRIBUTIVE DES SIGISER

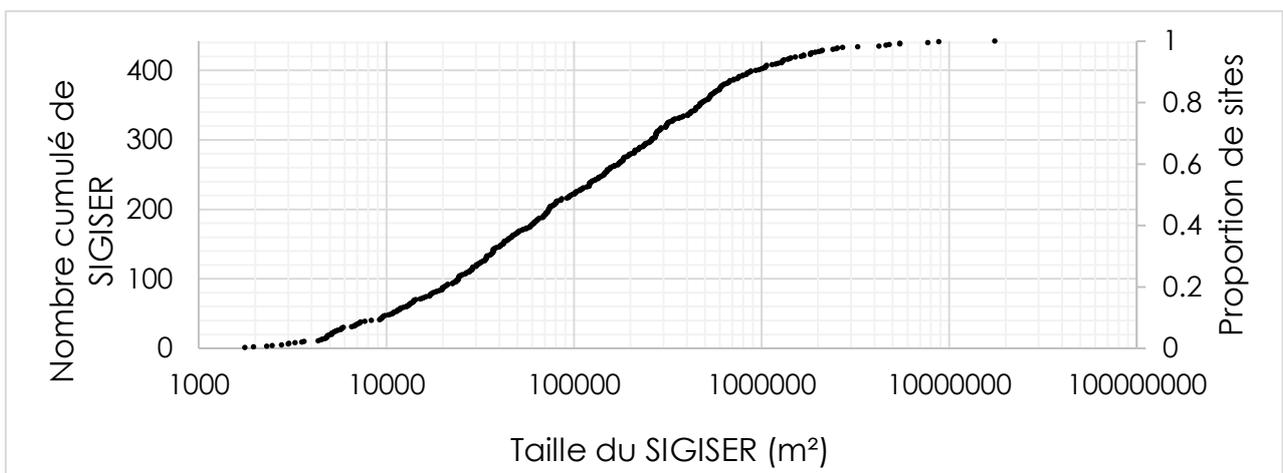


Figure 66 : DISTRIBUTION DES VALEURS DE SURFACE DE L'AIRE CONTRIBUTIVE DES SITES « OK » (VIA « WATERSHED ») (INDICE « AC_DP »)

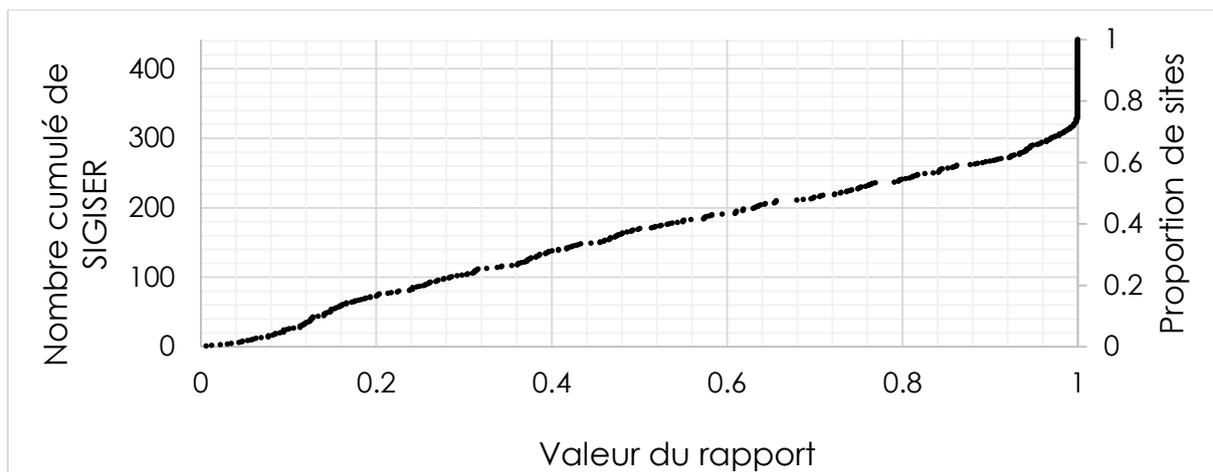


Figure 67 : DISTRIBUTION CUMULÉE DES VALEURS DE L'INDICE "RAP_ACSIG1"

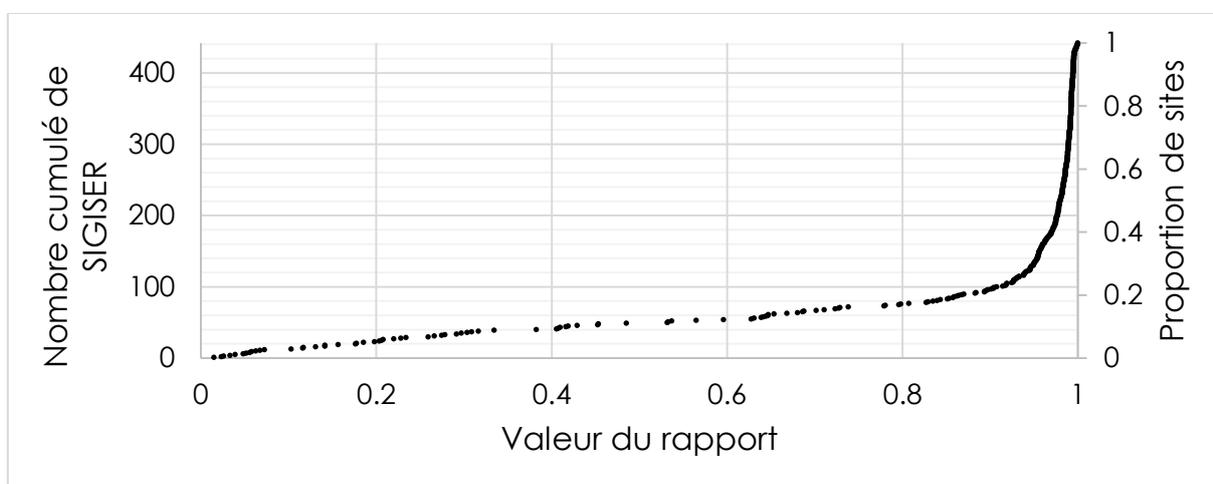


Figure 68 : DISTRIBUTION CUMULÉE DES VALEURS DE L'INDICE RAP_ACSIG2

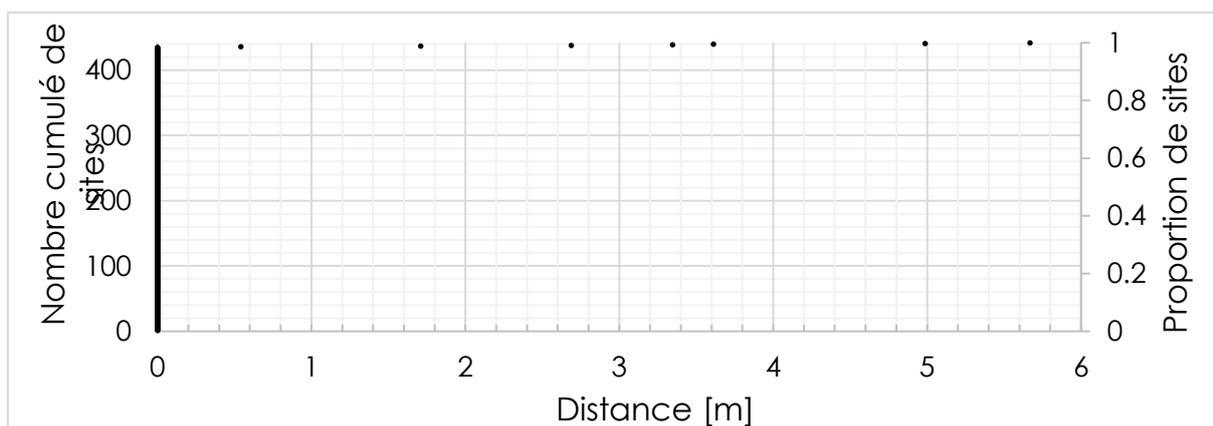


Figure 69 : DISTANCE ENTRE EXUTOIRE DU SITE "OK" SÉLECTIONNÉ ET LES RÉCEPTEURS DE RISQUE POTENTIELS LES PLUS PROCHES (INDICE « DIST_INFRA »)

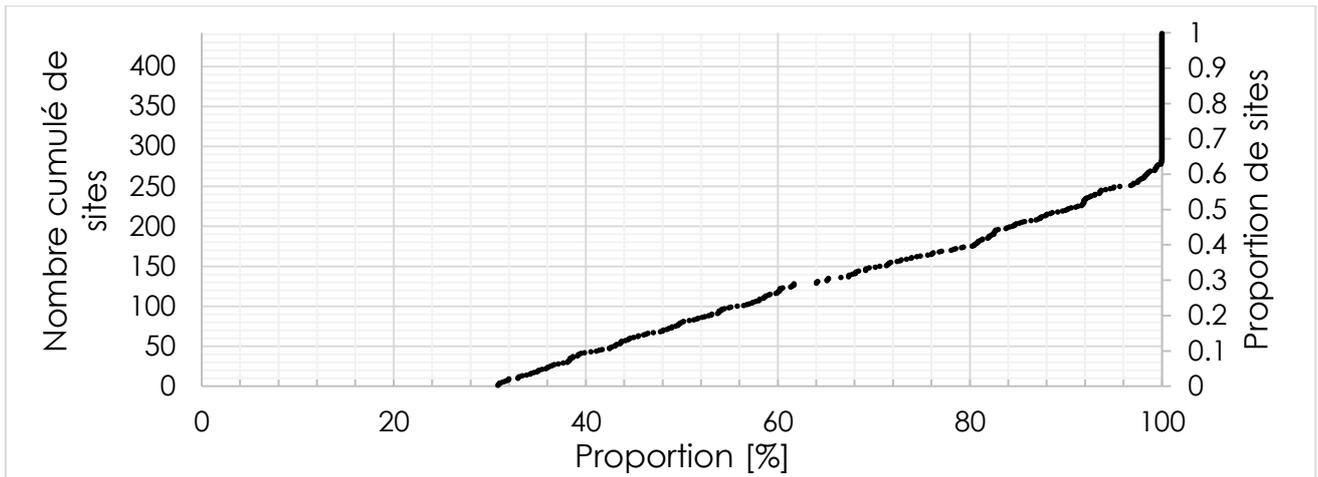


Figure 70 : PROPORTION DE RÉCÉPTEUR DE RISQUE POTENTIELS DANS UNE ZONE TAMPON DE 30 M AUTOUR DE L'EXUTOIRE DU SITE "OK" SÉLECTIONNÉ



Figure 71 : DISTRIBUTION CUMULÉE DES VALEURS DE L'INDICE « RAP_SIG_DP »

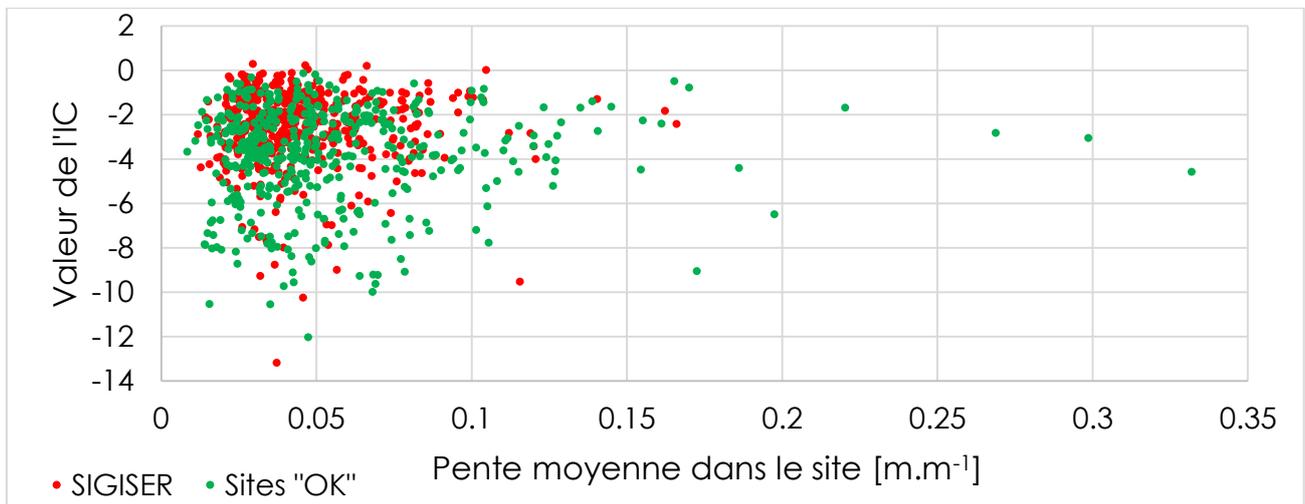


Figure 72 : VALEUR MOYENNE DE L'INDICE DE CONNECTIVITÉ EN FONCTION DE LA PENTE MOYENNE DANS L'AIRE CONTRIBUTIVE DU SITE

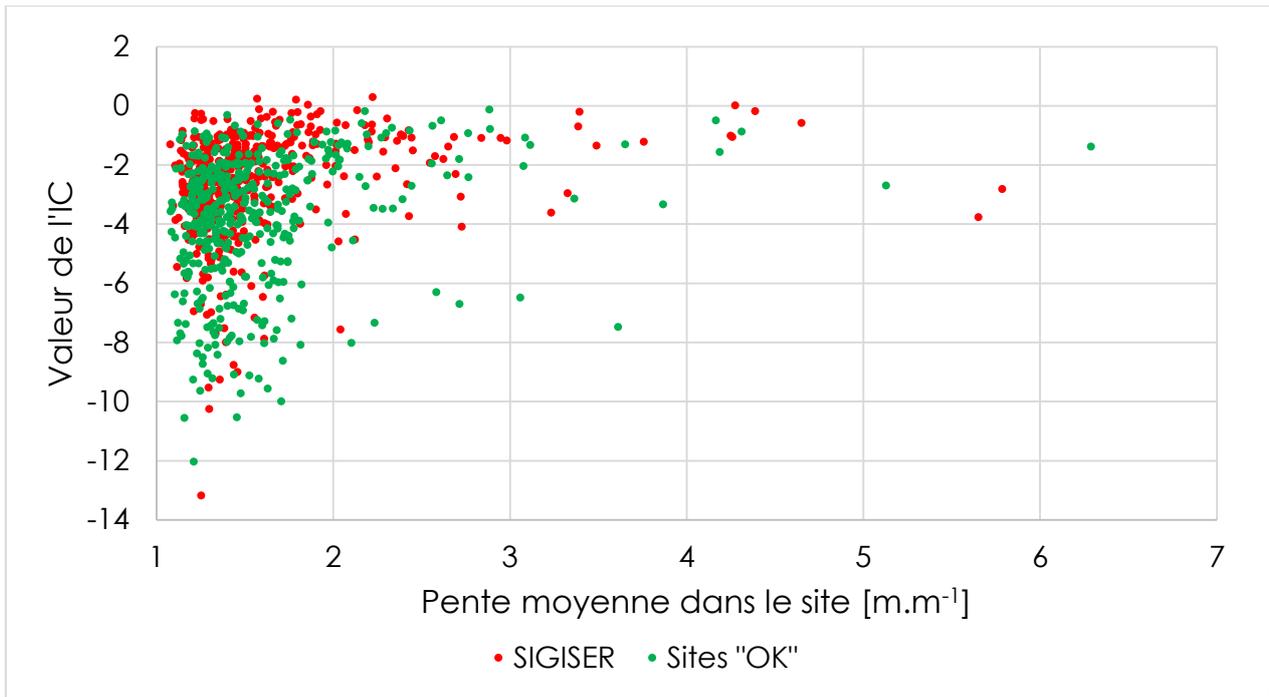


Figure 73 : VALEUR MOYENNE DE L'INDICE DE CONNECTIVITÉ EN FONCTION DE L'INDICE DE GRAVELIUS DU SITE (INDICES « GRAVEL_SIG » ET « GRAVEL_DP »)

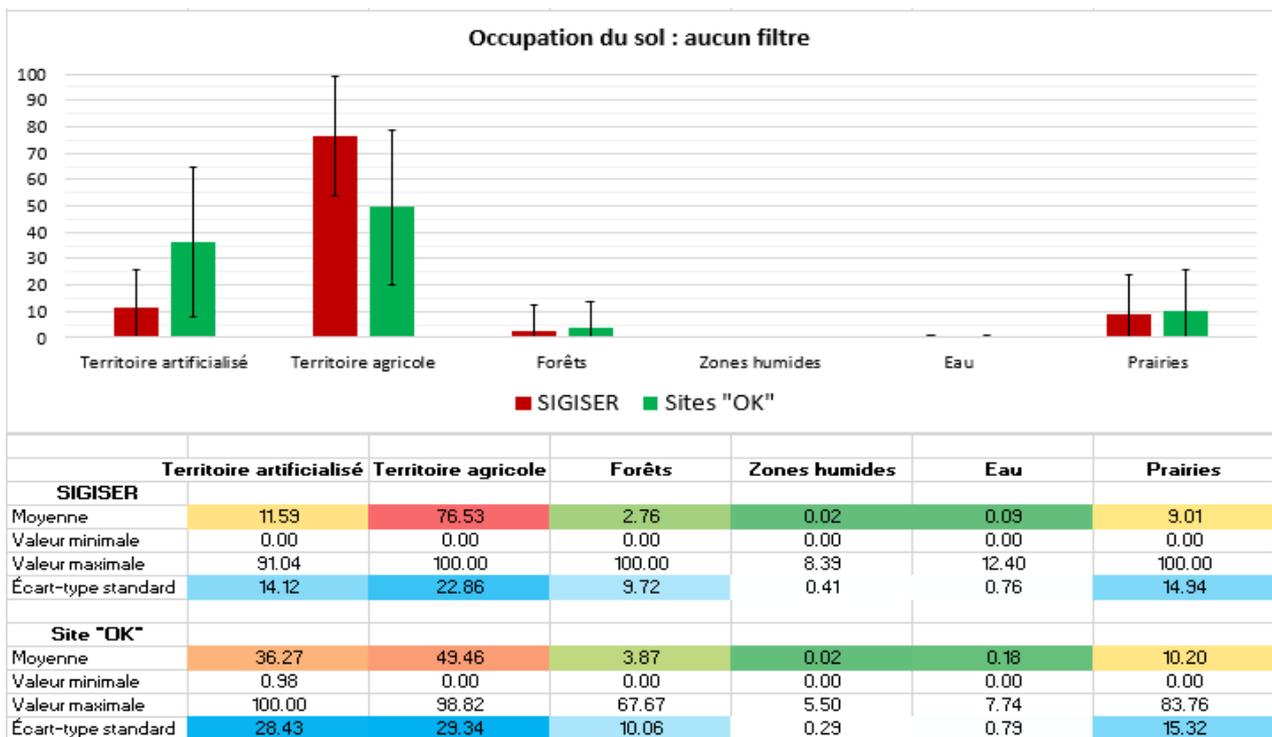


Figure 74 : STATISTIQUES SUR L'OCCUPATION DU SOL DANS LES DEUX TYPES DE SITES ÉTUDIÉS

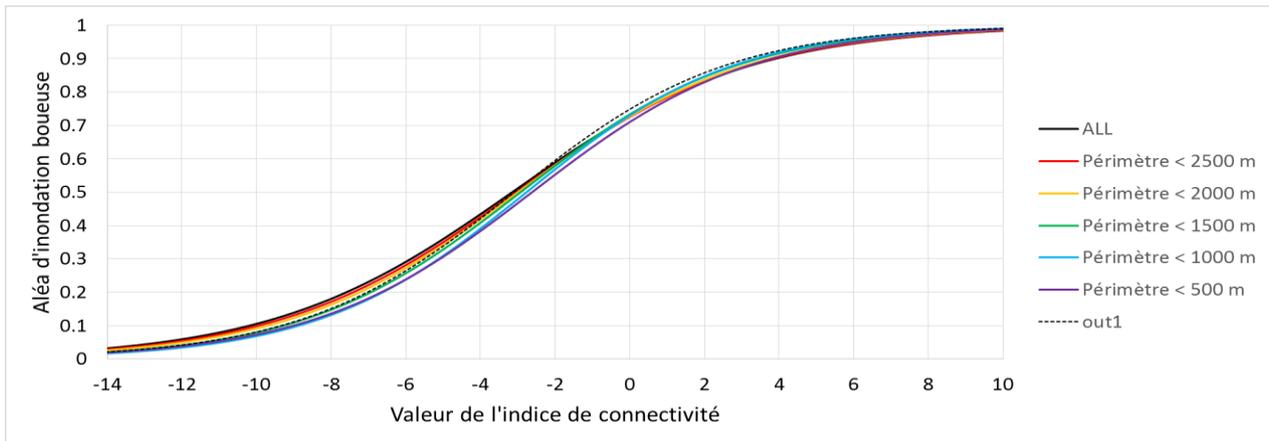


Figure 75 : RÉGRESSIONS LOGISTIQUES EN FONCTION DU FILTRE SUR LE PÉRIMÈTRE

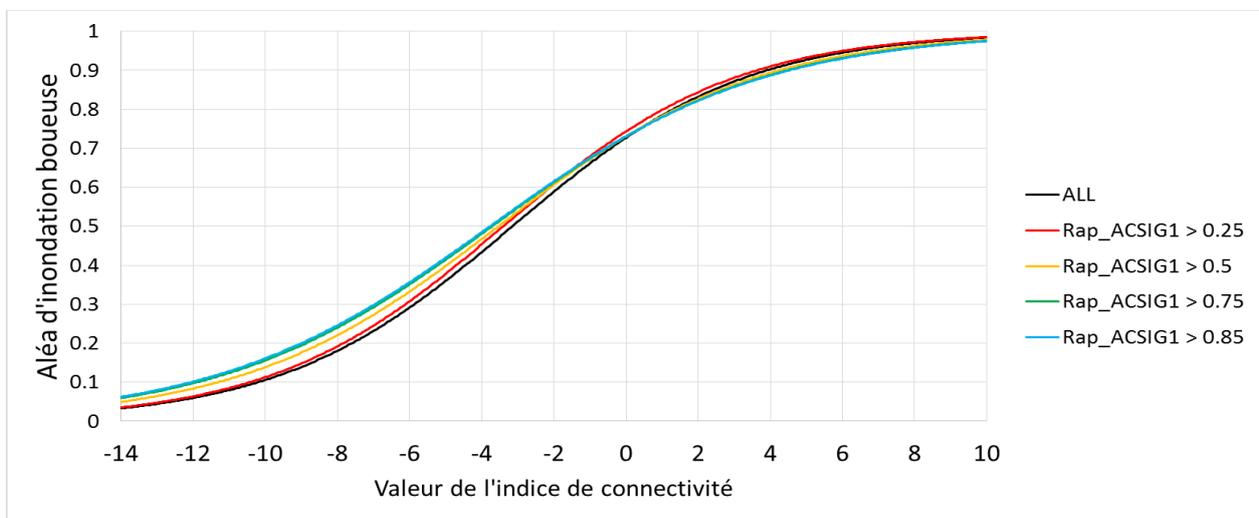


Figure 76 : RÉGRESSIONS LOGISTIQUES EN FONCTION DU FILTRE SUR RAP_ACSIG1

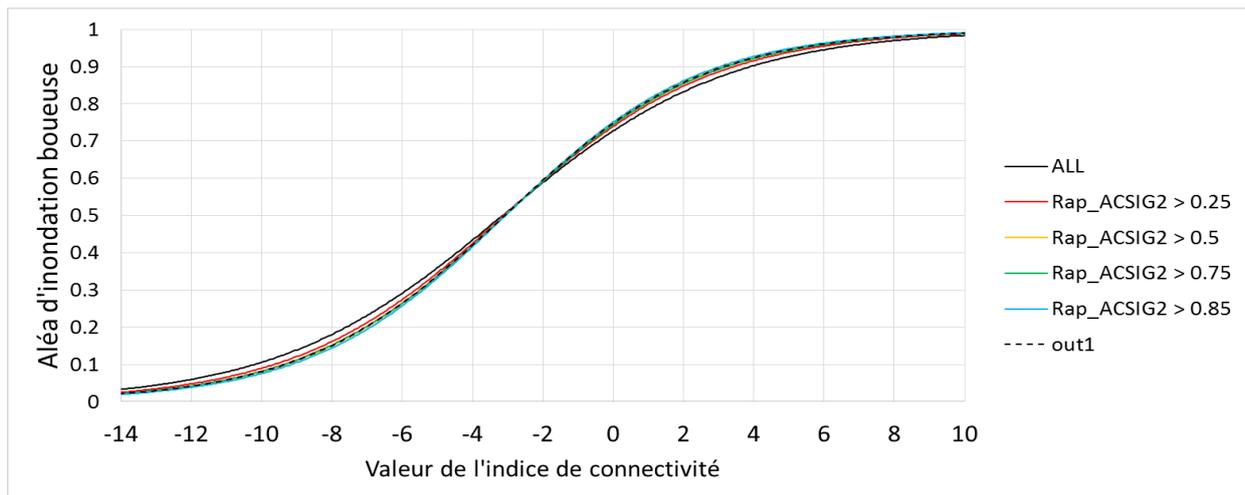


Figure 77 : RÉGRESSIONS LOGISTIQUES EN FONCTION DU FILTRE SUR RAP_ACSIG2

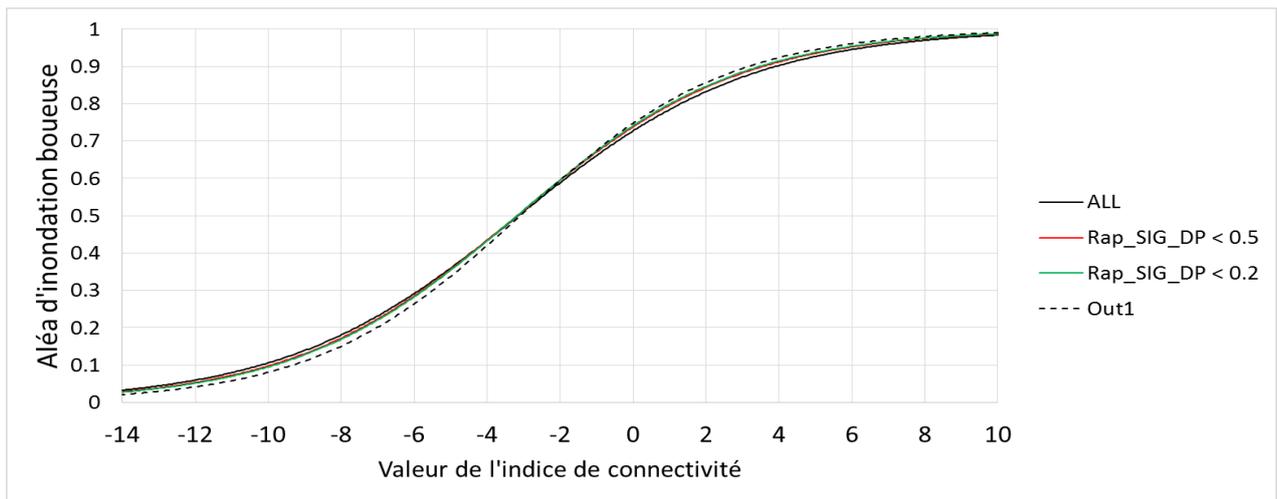


Figure 78 : RÉGRESSIONS LOGISTIQUES EN FONCTION DU FILTRE SUR RAP_SIG_DP

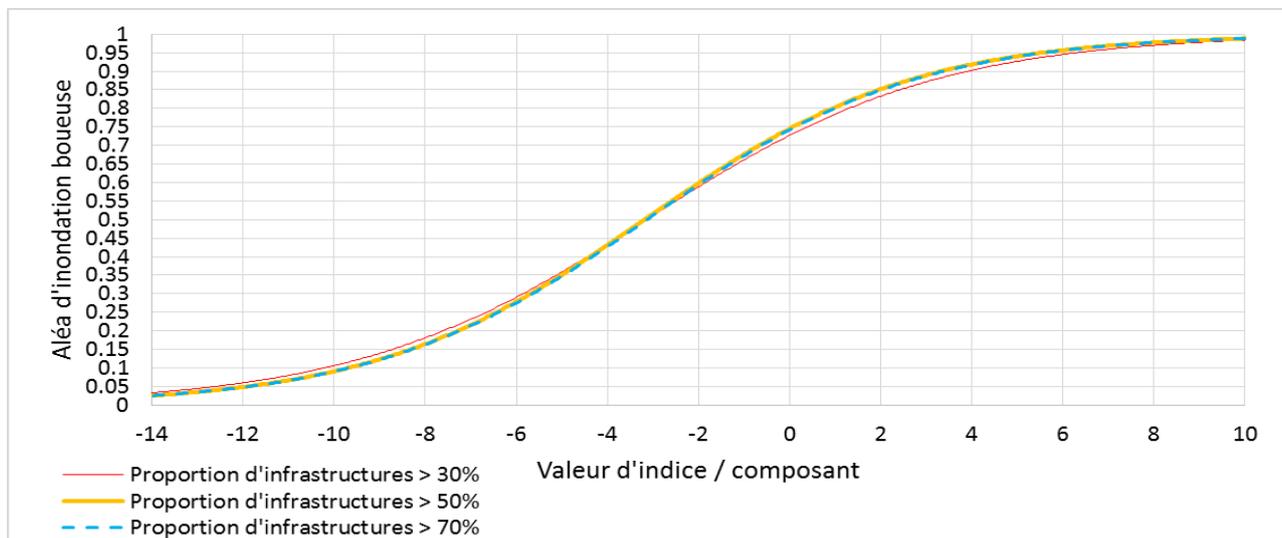


Figure 79 : COMPARAISON DES RÉGRESSIONS LOGISTIQUES OBTENUES EN FONCTION DU SEUIL DE PROPORTION D'INFRASTRUCTURES AUX SITES "OK" IMPOSÉ

7. Mise à jour et évaluation de la cartographie des parcelles à risque d'érosion hydrique 2008-2015

7.1. Résumé

Le présent travail a pour objectif d'améliorer le calcul des deux indicateurs de risque d'érosion parcellaire défini lors des deux conventions GISER précédentes sur base de la cartographie de l'érosion potentielle (EP) et de l'érosion tolérable (ET) en Wallonie : le code R GISER et l'indice d'érosion potentielle (IEP). Il consiste en l'optimisation du code calculant l'EP et en son adaptation pour les versions récentes (10.x) d'Arcpy. Le code est appliqué sur les parcellaires SIGEC 2008 à 2015 pour suivre l'évolution spatiale et temporelle du code R GISER. Celui-ci est également comparé à l'ancien code R, basé sur la pente de la parcelle, pour les années où celui-ci est disponible. Parallèlement, les possibilités d'améliorer la cartographie de l'ET sont étudiées.

7.2. Introduction

Lors de la convention GISER 2009-2011, une méthodologie de calcul et de cartographie de l'érosion potentielle en Région wallonne à l'échelle parcellaire a été développée sur base de facteurs liés à l'érosivité des pluies, l'érodibilité des sols et la topographie (Bielders et al., 2011). Parallèlement, le « code R GISER » a été défini pour caractériser les parcelles à risque, dont au moins 50 ares ou 50 pourcent de la surface ont un taux d'érosion potentiel dépassant la valeur seuil de $120 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ce code vise à remplacer le code R10 basé uniquement sur la pente observée de sorte qu'une parcelle est considérée à risque lorsque plus de 50 % de sa superficie ou plus de 50 ares présentent une pente supérieure ou égale à 10 %.

Dans la continuité de ce travail, la convention suivante (2011-2015) proposait une méthode de détermination des parcelles à risque d'érosion combinant aléa et vulnérabilité, c'est-à-dire l'érosion potentielle (EP) et l'érosion tolérable (ET), en un indice d'érosion potentielle (IEP) (GISER, 2015). Toutefois, l'ET n'étant actuellement pas définie sur l'ensemble de la Wallonie, il en va de même pour l'indice de risque IEP.

7.3. Objectifs poursuivis

Le présent travail consiste en l'optimisation du code calculant l'EP et en son adaptation

pour les versions récentes (10.x) d'Arcpy⁵. Le code sera appliqué sur les parcellaires SIGEC 2008 à 2015 pour suivre l'évolution spatiale et temporelle du code R GISER, vérifier la pertinence du seuil de 120 T ha⁻¹ an⁻¹. Celui-ci sera également comparé à l'ancien code R pour les années où celui-ci est disponible. Parallèlement, les possibilités d'améliorer l'étendue de la couche ET seront étudiées.

Spécifiquement, les tâches associées aux objectifs sont :

- Adapter et optimiser le code calculant l'EP pour la version 10.2 d'Arcpy (cf. 7.4) ;
- Réaliser une analyse qualitative et descriptive des données pour mettre en évidence les limitations possible du calcul du code R GISER sur l'ensemble de la Wallonie (cf. 7.5) ;
- Appliquer le calcul de l'EP et l'identification des parcelles en code R GISER pour les parcellaires agricoles de 2008 à 2015 (cf. 7.6.1)
- Comparer différents seuils d'érosion potentiels (cf. 7.6.2)
- Comparer les cultures et les prairies en code R GISER (cf. 7.6.3)
- Comparaison des codes R et code R GISER (cf. 7.6.4)
- Comparer la répartition du code R GISER selon les régions agricoles (cf. 7.6.5)
- Identifier les parcelles où l'ET est non ou partiellement définie et étendre la cartographie à la couverture totale de la SAU par interpolation des données manquantes (cf. 7.7.1) ;
- Evaluer l'évolution de l'IEP parcellaire (cf. 7.7.2)

7.4. Adaptation du code python pour le calcul de l'EP

Le code Python a été remanié pour s'adapter à la syntaxe de la version 10.2 d'Arcpy. En outre, plusieurs modifications ont été apportées pour optimiser la vitesse d'exécution et la gestion de la mémoire.

Vu la nécessité de faire tourner le code de l'érosion potentielle sur les années 2008 à 2015, toute optimisation du code peut mener à une amélioration significative du temps de calcul. Ainsi, la fonction calculant l'accumulation de flux parcellaire (équation de Desmet et Govers) originellement écrite en langage Python et préalablement identifiée comme limitante en terme de vitesse, a été isolée et remaniée selon la syntaxe imposée par le module Cython⁶. Ces modifications permettent de compiler la fonction en langage C, ce qui rend son exécution plus rapide. Les tests sur la fonction elle-même montre une amélioration de vitesse d'un facteur 4 :

⁵ Arcpy est une librairie fournie avec la suite de logiciels cartographique ArcGIS permettant de faire appel à des fonctions de manipulation de géodonnées depuis le langage Python.

⁶ Cython est un module python qui permet de convertir le code en langage C.

213 µs par boucle contre 931 µs par boucle appliqué à un jeu de données fictif. Les résultats ont été comparés à la fonction d'origine et sont strictement identiques.

Pour gagner davantage de vitesse, le prétraitement des couches cartographiques, c'est-à-dire le découpage de celles-ci en différentes zones sur lesquelles le calcul de l'EP s'opère, a été découplé. Celui-ci nécessite ArcGIS et son environnement Python 32bit. Le reste du calcul de l'EP a pu être lancé dans un environnement Python 64bit, ce qui peut contribuer à l'amélioration de la vitesse d'exécution et permet d'accéder à davantage de mémoire RAM.

Ainsi, le calcul de l'EP est passé d'environ 12 h à 4 heures d'exécution par parcellaire (ensemble de la Wallonie).

7.5. Analyse qualitative & exploratoire des données SIGEC

7.5.1. Méthodologie

Les données SIGEC couvrent les parcellaires de 2008 à 2015 sous forme de polygones vectoriels. Faute de temps, les parcellaires n'ont pas été obtenus par l'acquisition de licences officielles mais par récupération de données via des projets antérieurs. Une demande officielle a été lancée mais les données n'ont pas encore été reçues.

En fonction des années, les parcellaires ont des attributs différents détaillés en Annexe 1. Tous disposent d'un code d'identification des cultures. Seules les années 2009, 2011, 2012 et 2013 renseignent le code R10.

Vu le volume et la complexité des données, la qualité et les caractéristiques des parcellaires ne peuvent être évaluées visuellement et une série de tests automatisés doivent être effectués. Les tests proposés et appliqués sont les suivants :

- Vérification et réparation des géométries : *l'objectif de ce test est de vérifier et de réparer les défauts éventuels de géométrie. Le test fait appel aux fonctions Arcpy « checkGeometry » et « repairGeometry ».*
- Inventaire des parcelles après conversion : *le calcul de l'EP implique une conversion du parcellaire vectoriel au format matriciel. L'objectif de ce test est d'évaluer la perte d'information associée à la conversion.*
- Inventaire des intersections de parcelles : *les superpositions de parcelles sont des anomalies conceptuelles courantes dans les données SIGEC. Ce test évalue le nombre d'intersections.*
- Inventaire des parcelles hors domaine : *le calcul de l'EP opère sur la zone définie par le MNT ERRUISOL. Ce test évalue le nombre de parcelles partiellement ou entièrement en dehors de cette zone.*

En outre, des statistiques descriptives sont extraites des parcellaires concernant la distribution surfacique des parcelles.

7.5.2. Analyse qualitative

Les résultats de l'analyse qualitative sont présentés au Tableau 32.

Tableau 32 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUALITATIVE

Parcellaire	Norig	geomError	Δ Ngeom	Δ Nras	Ninter	Ndomain
parc2008	275 459	0	0	80	53 281	2 164
parc2009	275 028	5	0	107	45 743	2 183
parc2010	282 694	2 659	1	273	22 771	2 242
parc2011	275 673	1 234	0	54	20 166	2 170
parc2012	277 404	78	0	40	16 832	2 181
parc2013	278 354	86	0	75	16 227	2 173
parc2014	278 873	99	0	45	14 472	2 195
parc2015	279 047	210	0	141	17 759	2 239

Légende du Tableau 32 :

Norig	Le nombre de parcelles dans la donnée d'origine
geomError	Le nombre d'erreurs géométriques corrigées
ΔNgeom	Le nombre de parcelles supprimées suite aux corrections géométriques
ΔNras	Le nombre de parcelles supprimées suite à la conversion du parcellaire au format matriciel
Ninter	Le nombre d'intersections (NB : si deux parcelles A et B se croisent, $A \cap B$ et $B \cap A$ sont comptabilisés)
Ndomain	Le nombre de parcelles entièrement ou partiellement en dehors du domaine couvert par le MNT ERUISOL

En fonction des années, le nombre de défauts géométriques corrigés est variable. Seule une parcelle de géométrie nulle (la parcelle n'a pas été dessinée) a dû être supprimée des entités du parcellaire 2010. Le reste des défauts géométriques sont exclusivement de type « self-intersection », c'est-à-dire que le polygone dessiné est auto-sécant.

La conversion du parcellaire en format matriciel génère une perte de parcelles marginale, de l'ordre 0,05 %, mais variable selon les années. Une analyse visuelle *a posteriori* permet de mettre en cause la taille des parcelles et la présence de superposition de parcelles. D'une part, les parcelles trop petites, dont la taille ou la géométrie est trop fine par rapport à la résolution de 10 x 10 m imposée par le MNT, sont effacées lors du processus. D'autre part, les parcellaires révèlent des parcelles se superposant parfaitement du point de vue géométrique : des doublons parfaits. Seule une des deux parcelles est ainsi représentée dans la donnée matricielle, l'autre étant écrasée. Les doublons parfaits ont été évalués au nombre de 62 paires pour l'année 2013.

En outre, il est judicieux de remarquer que les parcelles de petites tailles néanmoins conservées lors de la conversion au format matriciel sont davantage entachées d'incertitudes en ce qui concerne l'estimation des surfaces, et *a fortiori* l'attribution d'un code R GISER.

L'analyse qualitative met également en évidence un nombre élevé d'intersection de parcelles. De manière générale, les superpositions faussent le calcul des surfaces agricoles réelles. La majeure partie des superpositions sont des effets de bords due à des parcelles adjacentes dont la géométrie est mal définie. Tant que la superposition concerne une superficie inférieure à la résolution du MNT, l'effet n'a pas d'incidence sur le calcul de l'EP. Dans le cas contraire, la surface correspondant à la superposition sera arbitrairement allouée à l'une ou l'autre parcelle.

Les superpositions incluent également les doublons parfaits évoqués mais il existe également des doublons imparfaits, comme celle représentée à la Figure 80. La parcelle délimitée en cyan (parcelle A) possède un appendice (en bleu) absente de la parcelle possédant approximativement la même géométrie (parcelle B). Ces superpositions imparfaites sont problématiques dans le sens où si la parcelle B se surimpose à A lors de la conversion au format matricielle, la parcelle A sera assimilée uniquement à la surface de l'appendice et le calcul de l'EP ne sera pas représentatif de la parcelle dans son ensemble.

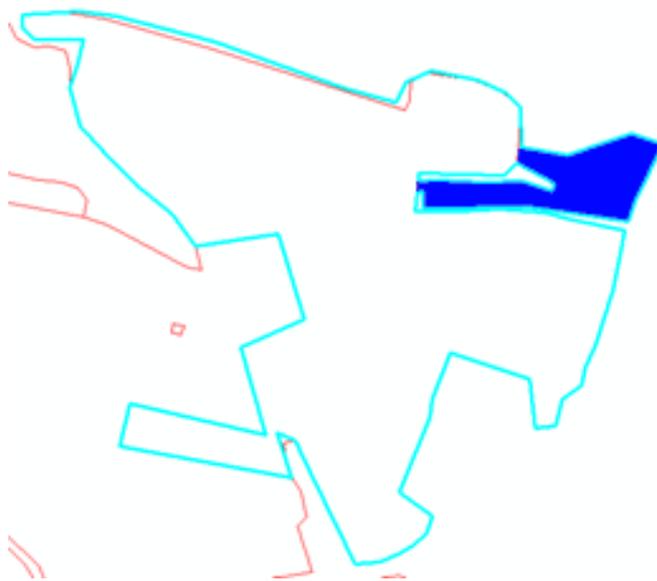


Figure 80 : SUPERPOSITION IMPARFAITE DE DEUX PARCELLES

Enfin, chaque année, environ 2000 parcelles hors domaine présentent un risque de calcul erroné du code R GISER en raison du fait qu'elles sont situées partiellement ou entièrement en dehors de la surface définie par le MNT ERRUISOL.

7.5.3. Analyse surfacique des parcellaires

Quelques statistiques relatives à la surface des parcelles ont été appliquées aux parcellaires corrigés géométriquement. Elles sont présentées au Tableau 33. Les propriétés statistiques sont relativement stables dans le temps. Nous remarquerons que les parcellaires contiennent chacun au moins une parcelle de très petite taille (≤ 1 are) susceptible d'être effacée lors du passage au format matriciel. Par ailleurs, chaque parcellaire contient des objets de taille importante, de l'ordre de 90 ha, s'écartant considérablement de la distribution vu que 90 % des parcelles ont une taille inférieure à $\sim 6,35$ ha.

Tableau 33 : RÉSULTAT DE L'ANALYSE SURFACIQUE (VALEURS EN HA)

Année	Min	Max	Moy	Tot	p10	p25	p50	p75	p90
2008	0.00	88.96	2.77	762 183.95	0.40	0.79	1.67	3.48	6.33
2009	0.00	88.96	2.77	761 623.68	0.40	0.78	1.67	3.49	6.37
2010	0.00	88.96	2.73	770 493.20	0.38	0.75	1.63	3.43	6.29
2011	0.00	98.63	2.77	764 168.97	0.40	0.78	1.68	3.50	6.38
2012	0.00	98.63	2.76	766 207.50	0.39	0.77	1.67	3.49	6.37
2013	0.01	98.63	2.76	767 078.48	0.38	0.77	1.67	3.48	6.36
2014	0.01	96.64	2.76	768 388.52	0.38	0.77	1.66	3.49	6.36
2015	0.00	95.39	2.75	768 192.93	0.37	0.75	1.66	3.48	6.39

7.6. Analyse qualitative & exploratoire des données SIGEC

7.6.1. Calcul de l'érosion potentielle

Le code du calcul de l'érosion potentielle a été appliqué à l'ensemble des parcelles corrigées géométriquement. Il a été remarqué que la couche cartographique de la direction des flux ne couvrait pas la totalité de la Wallonie. Une portion du bassin de la Dyle-Gette en province de Liège était absente, de même pour une carrière située en province du Hainaut⁷.

Pour le premier cas, les données manquantes ont été récupérées auprès de P. Demarcin. Pour le second, la direction et l'accumulation de flux ont été estimées localement sur base du modèle numérique de terrain non traité, c.-à-d. sans y appliquer la fonction ArcGIS de remplissage des cuvettes. Les données dérivées de la couche de direction des flux ont également été recalculées.

Ainsi, de 2008 à 2015, l'EP a été calculée sur le domaine défini par le modèle numérique de terrain.

7.6.2. Évaluation des seuils définissant le code R GISER

Le code R GISER permet d'identifier les parcelles présentant une érosion potentielle supérieure à 120 T.ha⁻¹.an⁻¹ sur plus de 50 ares ou sur plus de 50 % de sa superficie. Ce seuil élevé a été établi sur base de la correspondance des superficies concernées par le code R10 en 2009.

La présente analyse permet d'identifier quel seraient les parcelles et surfaces concernées de 2008 à 2015 par le code R GISER pour une série de seuils variant de 0 à 800 T.ha⁻¹.an⁻¹. Les résultats sont présentés au Tableau 34, au Tableau 35 et à la Figure 83.

⁷ Coordonnées Lambert : 98650 m, 130509 m

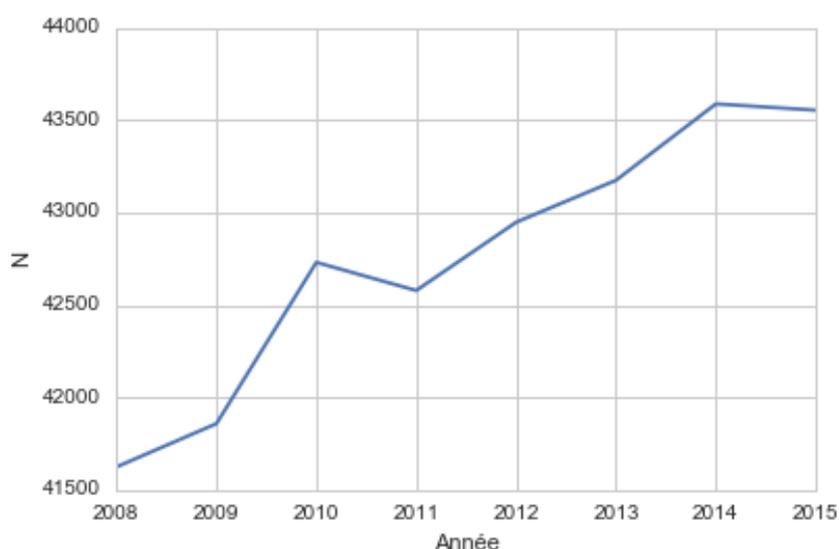


Figure 81 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE PARCELLES EN CODE R GISER AU SEUIL DE 120 T.HA⁻¹.AN⁻¹

Tableau 34 : NOMBRE DE PARCELLES EN CODE R GISER SELON DIFFÉRENTS SEUILS

Seuil [T ha ⁻¹ an ⁻¹]	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
0	275379	274921	282420	275619	277364	278279	278828	278906
10	230633	230565	236845	232048	233893	234622	235469	234957
20	182038	182270	186979	184067	185890	186793	187722	187093
30	147624	148079	151853	149946	151421	152111	153173	152780
40	122341	122880	125866	124521	125669	126441	127287	127059
50	103234	103764	106269	105364	106260	106858	107714	107495
60	88407	88892	90965	90349	91029	91535	92322	92139
70	76538	76993	78681	78271	78966	79446	80065	79941
80	66867	67302	68771	68397	69053	69499	70027	69938
90	58819	59173	60438	60199	60742	61126	61654	61602
100	52175	52449	53579	53316	53779	54139	54646	54575
120	41624	41858	42730	42578	42947	43174	43587	43553
140	33867	34051	34787	34615	34958	35143	35482	35468
160	27911	28078	28725	28592	28880	29027	29353	29321
180	23409	23552	24076	23996	24230	24360	24579	24525
200	19757	19878	20281	20300	20478	20585	20733	20652
250	13327	13415	13653	13709	13786	13850	13902	13864
300	9436	9500	9623	9694	9743	9798	9821	9836
350	6909	6947	7053	7089	7135	7126	7142	7124
400	5176	5213	5287	5362	5387	5346	5363	5341
450	3946	3977	4042	4043	4077	4066	4076	4069
500	3020	3051	3108	3135	3155	3152	3161	3159
550	2376	2406	2428	2444	2483	2463	2456	2451
600	1877	1881	1889	1922	1946	1939	1938	1926
650	1491	1506	1508	1544	1558	1548	1544	1538
700	1167	1170	1179	1217	1225	1218	1207	1197
750	937	944	953	982	991	980	972	950
800	757	764	774	805	809	801	786	775

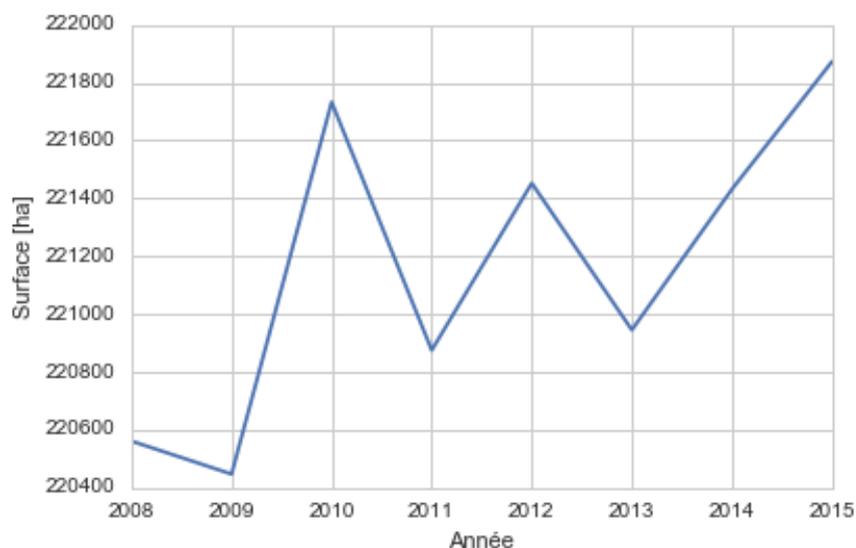


Figure 82 : ÉVOLUTION DE LA SURFACE AGRICOLE EN CODE R GISER AU SEUIL DE 120 T.HA⁻¹.AN⁻¹

Tableau 35 : SURFACE AGRICOLE EN CODE R GISER SELON DIFFÉRENTS SEUILS

Seuil [T ha ⁻¹ an ⁻¹]	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
0	762319	761778	770213	764480	766482	767249	768661	767799
10	706799	706711	714448	709847	711940	712519	714389	713830
20	627062	627589	634128	631127	633212	634178	635974	635458
30	549788	550759	556683	554400	556459	556669	559232	559278
40	480997	481948	487218	485426	486552	487668	489357	489856
50	424622	425247	429979	428315	429482	429991	431761	432151
60	378053	378843	382392	381034	381820	381921	383596	383972
70	339940	340693	343608	342314	343518	343633	344763	345032
80	309027	309504	312216	310583	311739	312061	312784	312970
90	282114	282308	284638	283222	283966	284061	285317	285645
100	259036	258839	260913	259548	260010	260052	261021	260999
120	220561	220447	221732	220875	221452	220945	221431	221872
140	189767	189722	190994	189966	190503	189987	190192	190299
160	164534	164121	165295	164392	164808	164284	164817	164732
180	144222	144209	145115	144389	144451	144066	144312	144062
200	127334	127072	127718	127534	127383	127127	127041	126484
250	95107	95124	95387	95330	94975	94737	94303	93830
300	73085	73079	72736	72965	72791	72327	71768	71714
350	57154	56961	56820	56793	56537	55974	55570	55128
400	45425	45254	45145	45288	45053	44301	44088	43924
450	36465	36237	36269	36006	35937	35547	35254	34994
500	29483	29350	29476	29442	29290	28914	28613	28374
550	24092	24118	24048	24003	23910	23373	23075	22854
600	19994	19701	19444	19489	19409	19181	18877	18617
650	16435	16353	16175	16460	16231	16007	15664	15482
700	13397	13295	13170	13402	13189	13030	12648	12537
750	11112	11023	11027	11091	10984	10751	10636	10364
800	9385	9381	9355	9449	9263	9091	8887	8677

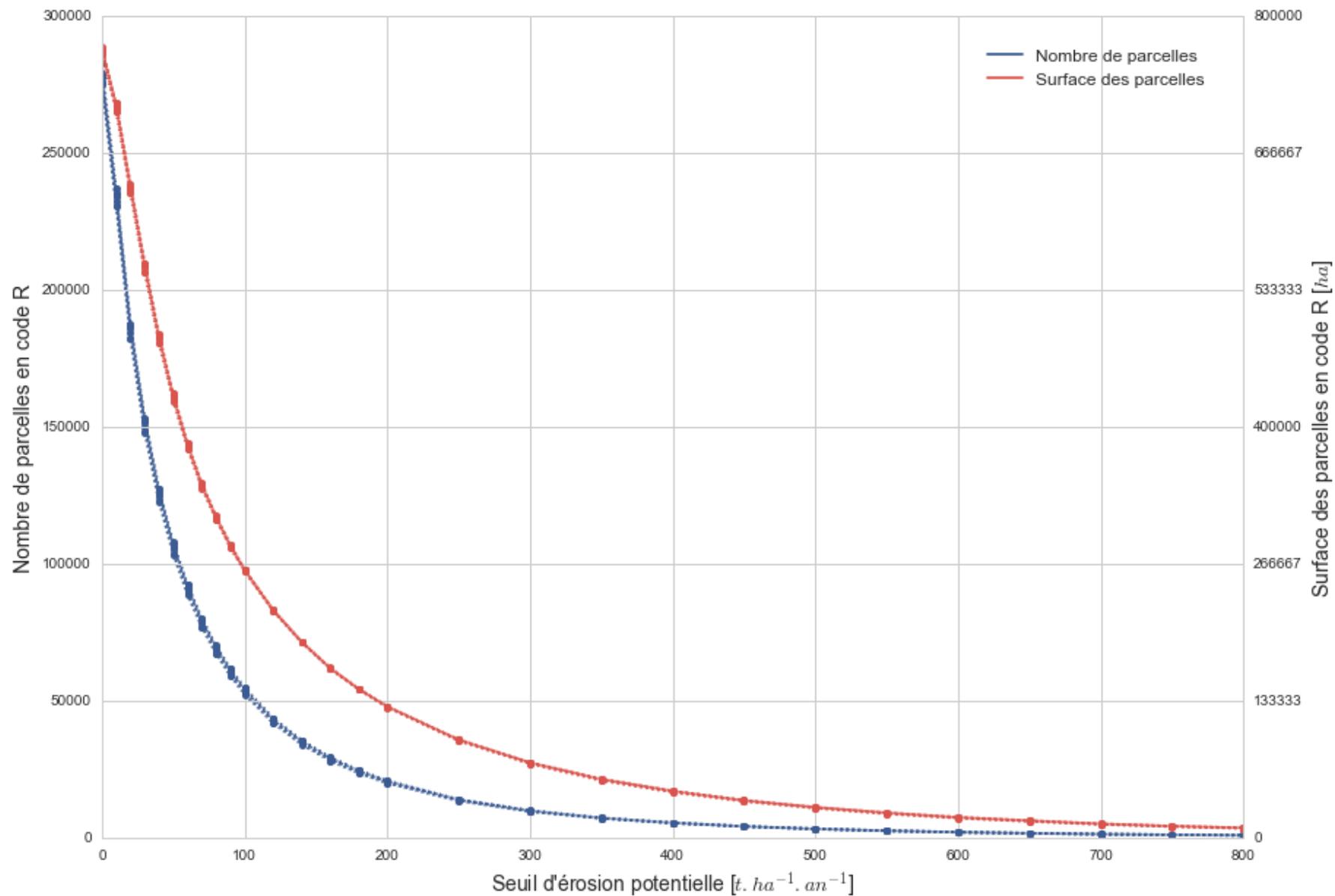


Figure 83 : NOMBRE ET SURFACE DES PARCELLES SELON DIFFÉRENTS SEUILS D'ÉROSION POTENTIELLE (SIGEC 2008-15)

7.6.3. Évaluation des seuils définissant le code R GISER

Selon le code culture présent dans les attributs des couches SIGEC, les parcelles ont été classées selon qu'elles soient une culture ou une prairie⁸. Les prairies temporaires ont été considérées comme des cultures.

Les résultats de la comparaison des codes R GISER pour les cultures et les prairies sont présentés au

Tableau 36, à la Figure 84 et à la Figure 85.

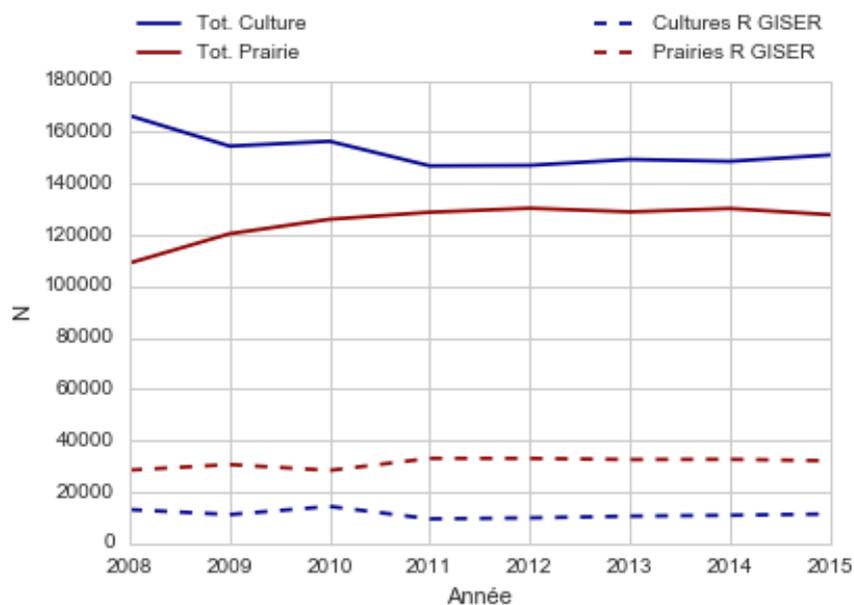


Figure 84 : NOMBRE DE PRAIRIES ET DE CULTURES EN CODE R GISER

⁸ Les prairies ont un code culture commençant par le chiffre 6.

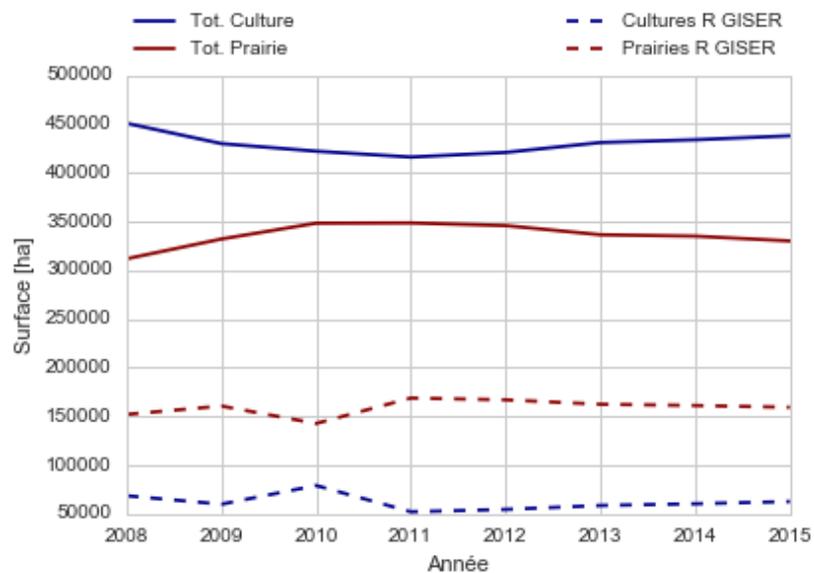


Figure 85 : SURFACE DES PRAIRIES ET DES CULTURES EN CODE R GISER

Tableau 36 : ÉVALUATION DU CODE R GISER EN TERME DE PRAIRIES ET CULTURES

Année	Nb Tot. Culture	Nb Tot. Prairie	Surf. Tot. Culture [ha]	Surf. Tot. Prairie [ha]	Nb Cultures R GISER	Nb Prairies R GISER	Surf. Cultures R GISER [ha]	Surf. Prairies R GISER [ha]
2008	166 358	109 021	450 647	311 672	13 132	28 492	68 541	152 021
2009	154 500	120 421	429 820	331 959	11 199	30 659	59 875	160 572
2010	156 378	126 041	422 026	348 188	14 357	28 373	79 042	142 690
2011	146 828	128 791	416 014	348 467	9 533	33 045	52 108	168 768
2012	147 014	130 350	420 757	345 726	9 909	33 038	54 528	166 924
2013	149 342	128 937	430 919	336 331	10 589	32 585	58 557	162 389
2014	148 583	130 245	433 763	334 899	10 912	32 675	60 317	161 115
2015	151 072	127 834	437 816	329 983	11 439	32 114	62 609	159 264
Moyen	152 509	125 205	430 220	335 903	11 384	31 373	61 947	159 218

7.6.4. Comparaison du code R et du code R GISER

Compte tenu des données dont nous avons pu disposer, les parcellaires 2009, 2011, 2012 et 2013 disposent d'attribut code R. Ceux-ci sont formatés différemment d'une année à l'autre et la première partie de l'analyse consistait en un prétraitement visant à uniformiser l'attribut. Le Tableau 37 compare les parcelles classées en code R10 et en code R GISER en termes de nombre de parcelles et de surface pour les quatre années considérées. La Figure 86 présente la distribution des parcelles classée en code R ou en code R GISER par rapport à l'érosion potentielle pixellaire moyenne des parcelles.

Tableau 37 : COMPARAISON CODE R10 ET CODE R GISER

Année	Code R10		Code R GISER		Code R10 et R GISER	
	N	S [ha]	N	S [ha]	N	S [ha]
2009	56 157	221 423	41 858	220 358	34 692	179 203
2011	57 682	223 008	42 578	220 765	35 612	180 842
2012	58 296	223 595	42 947	221 348	35 933	181 365
2013	52 145	203 169	43 174	220 843	34 257	170 150
Moyenne	56 070	217 799	42 639	220 829	35 124	177 890

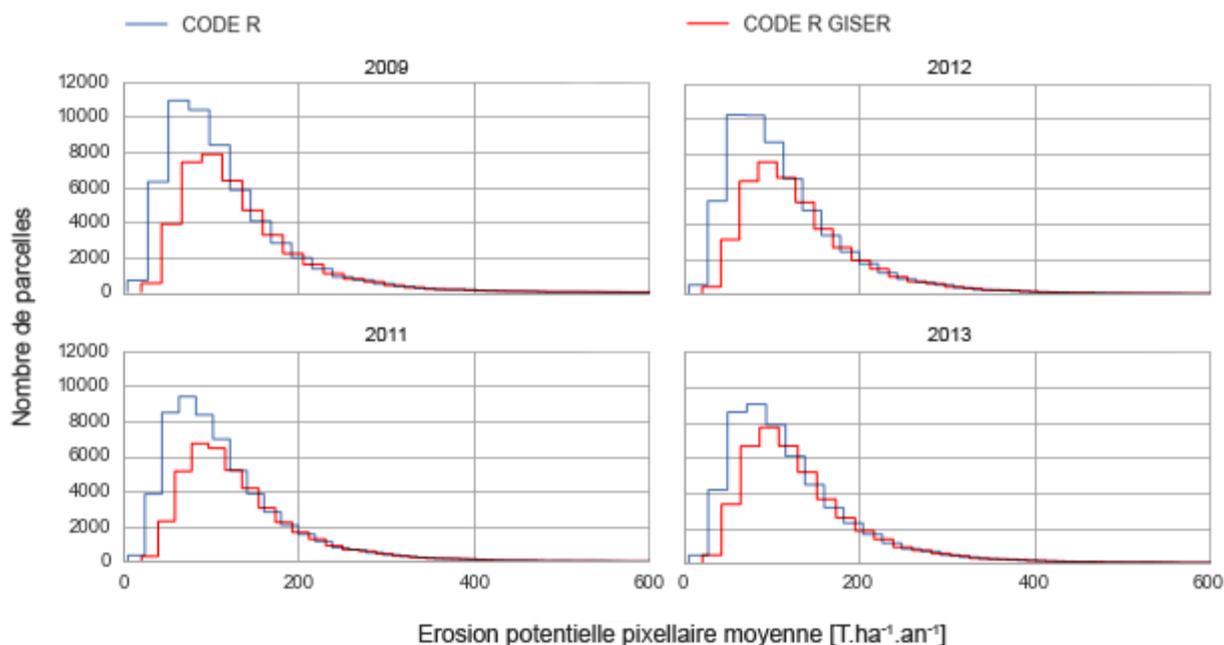


Figure 86 : DISTRIBUTION PARCELLAIRE DE L'ÉROSION POTENTIELLE PIXELLAIRE MOYENNE DES PARCELLES CLASSÉE EN CODE R ET EN CODE R GISER (2009, 2011, 2012 ET 2013)

L'année 2013 montre un nombre de parcelle et une surface en code R significativement en deçà des chiffres stables observés pour les autres années. Aucun changement notable dans la distribution du code R GISER selon les années n'est observable. Nous pouvons donc exclure des changements majeurs de géométrie comme étant responsable des proportions inférieures

observées en 2013. Ceci laisse supposer que l'attribut code R pour 2013 n'a pas été établi selon la même méthode et qu'il ne s'agirait pas là de la donnée officielle.

Le code R GISER représente un nombre de parcelles 25 % inférieure à celui du code R. Les surfaces agricoles concernées restent similaires. Ceci est cohérent avec l'approche choisie en 2009 pour fixer le seuil, l'objectif étant de conserver un nombre de parcelles équivalent ou légèrement inférieur en R GISER comparé à R10. Comme le montre la Figure 86, le code R GISER sélectionne en moyenne des parcelles à plus hautes valeurs d'érosion. Le fait que les surfaces concernées par le R GISER soient plus faibles que les surfaces en R10 est donc compensé par plus grande efficacité dans la sélection de parcelles à haut risque d'érosion.

7.6.5. Répartition du code R en fonction des régions agricoles

Les régions agricoles ont été jointes spatialement aux parcellaires par une opération « spatial join » en mode « intersect » dans ArcGIS. Ainsi la distribution des codes R GISER selon les régions a pu être analysée et est présentée au

Tableau 38. En particulier, l'année 2008 montre une distribution régionale très différente.

Tableau 38 : RÉPARTITION DU CODE R GISER SELON LES RÉGIONS AGRICOLES

REGIONS AGRICOLES																						
Année	ARDENNE		CONDROZ		FAGNE		FAMENNE		HAUTE ARDENNE		REGION HERBAGERE		REGION JURASSIQUE		REGION LIMONEUSE		REGION SABLO-LIMONEUSE		Non classée		Total N	Total Aire
	N	Aire ha	N	Aire ha	N	Aire ha	N	Aire ha	N	Aire ha	N	Aire ha	N	Aire ha	N	Aire ha	N	Aire ha	N	Aire ha		ha
2008	13436	63943	5498	36293	1128	7782	4122	25254	4506	17614	18233	58730	7486	38012	3040	16867	1194	7839			41624	220561
2009	6095	30985	5797	31523	809	4206	2783	14925	1849	10051	18237	48915	2980	15477	1885	9461	16357	86494			41858	220447
2010	6197	31820	6011	31248	852	4437	3085	15489	2055	10114	18227	47474	2809	14491	1930	10460	16087	84418	1	10	42282	219427
2011	6009	30595	6166	32822	863	4667	3245	16580	1732	9195	18240	49962	2584	13234	1966	10542	16504	85304	2	3	42534	220572
2012	6057	31487	5999	31228	762	3901	3134	16326	2211	10896	18238	51030	2759	14571	2031	11056	16098	82086			42620	219604
2013	6170	31856	6228	32132	856	4263	3273	17005	1864	9202	18239	50843	2847	14815	2010	10280	16320	83127	1	15	42739	218621
2014	5998	29984	6158	30750	794	4195	3192	16526	1758	8879	18240	50637	2796	14363	2071	10655	16730	85172	1	1	43052	218990
2015	6395	32503	6121	31209	921	4757	3373	16960	1826	9307	18234	50410	2942	14872	1963	10493	16139	82170	1	2	42916	218900

7.7. Amélioration de l'estimation de l'érosion tolérable en SAU et calcul de l'IEP

7.7.1. Amélioration de l'érosion tolérable

L'ET a été évaluée en collaboration avec l'équipe du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (PCNSW). Sa définition se base sur la profondeur utile du sol, la présence éventuelle d'une contrainte et la charge caillouteuse. Pour la plupart des sigles pédologiques, il est ainsi possible d'y associer une érosion tolérable. Toutefois, certains sigles n'ont pas pu se voir attribuer une classe d'ET car ils représentent soit (1) des sols non cartographiés ou confidentiels, (2) soit des sols présentant une variabilité locale de profondeur trop importante, (3) soit parce que ce même sigle englobe des réalités spatiales différentes en matière d'ET qui ne sont pas représentatives de l'ensemble des sols partageant ce sigle en région wallonne (l'interprétation d'un sigle dépend dans certains cas de la région où l'on se trouve). Dès lors, près de 15 % de la Wallonie n'a pas pu être cartographié, soit environ 5 % (40. 000 ha) de la surface agricole utilisée (SAU).

Pour assurer la complétude des données d'érosion tolérable, une réunion avec Xavier Legrain a été tenue le 26 janvier 2016. Celui-ci s'est dit en mesure de fournir des précisions locales quant aux classes de profondeur. Un fichier contenant les zones non cartographiées est transmis dans les livrables.

En guise d'approche temporaire, la fonction GDAL `gdalFillNoData` a été utilisée sur la couche d'ET. Il s'agit d'un algorithme d'interpolation depuis les bords basé sur la distance inverse, appliqué itérativement à l'ET, jusqu'à l'absence de No Data en SAU, sans lissage, avec une fenêtre de 5 pixels. Ainsi, le calcul de l'IEP pixelaire a pu être calculé pour l'ensemble de la Wallonie comme étant le ratio de l'EP et de l'ET.

7.7.2. Analyse de l'IEP parcellaire

Pour rappel, le risque attribué à chaque parcelle est la valeur de l'IEP pixelaire telle que 50 % de la parcelle (parcelles < 1 ha) ou 50 ares (parcelles ≥ 1 ha) aient une valeur supérieure à cette valeur d'IEP.

Le

Tableau 39 et le

Tableau 40 reprennent respectivement les nombres de parcelles et la surface agricole à risque pour différents seuils d'IEP au-delà desquelles elles sont classées à risque. Les résultats sont représentés graphiquement à la Figure 87. Sur cette base, un seuil d'IEP de 18 permettrait de sélectionner un nombre de parcelles équivalent au code R10 actuel.

Une analyse plus poussée pourrait être faite pour comparer les 3 seuils (pente = 10 %, EP = 120 T.ha⁻¹.an⁻¹ et IEP = 18).

Tableau 39 : NOMBRE DE PARCELLES À RISQUE SELON DIFFÉRENTS SEUILS D'IEP

Seuil	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
2	181 112	181 575	186 568	183 641	185 624	186 467	187 540	186 931
4	133 203	133 799	137 562	135 656	137 161	138 018	139 060	138 572
6	107 316	107 728	110 633	109 290	110 488	111 157	112 121	111 791
8	89 802	90 334	92 606	91 602	92 538	93 177	93 912	93 577
10	76 878	77 368	79 207	78 554	79 250	79 805	80 509	80 240
12	66 853	67 227	68 811	68 310	68 900	69 356	69 992	69 805
14	58 638	59 018	60 404	59 990	60 580	60 977	61 574	61 376
16	51 766	52 088	53 272	52 965	53 516	53 883	54 390	54 309
18	46 067	46 373	47 390	47 143	47 599	47 949	48 396	48 344
20	41 298	41 539	42 464	42 280	42 693	43 025	43 432	43 406

Tableau 40 : SURFACE AGRICOLE À RISQUE SELON DIFFÉRENTS SEUILS D'IEP [ha]

Seuil	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
2	612 597	613 416	619 977	617 181	619 315	620 114	622 255	621 704
4	480 023	480 997	486 629	483 969	485 564	486 687	488 440	488 449
6	404 584	403 962	408 565	406 253	407 954	408 380	410 174	410 241
8	355 315	355 414	359 073	356 947	358 308	358 798	359 808	359 371
10	318 835	318 908	321 657	319 995	320 846	321 035	321 925	321 737
12	289 339	289 190	291 709	290 178	291 192	290 960	291 855	291 846
14	264 217	264 083	266 447	264 961	265 791	265 831	266 739	266 661
16	242 233	242 096	243 968	242 877	243 730	243 664	244 294	244 453
18	222 829	223 014	224 696	223 818	224 371	224 163	224 514	224 763
20	206 397	206 437	207 917	207 016	207 576	207 348	207 573	207 963

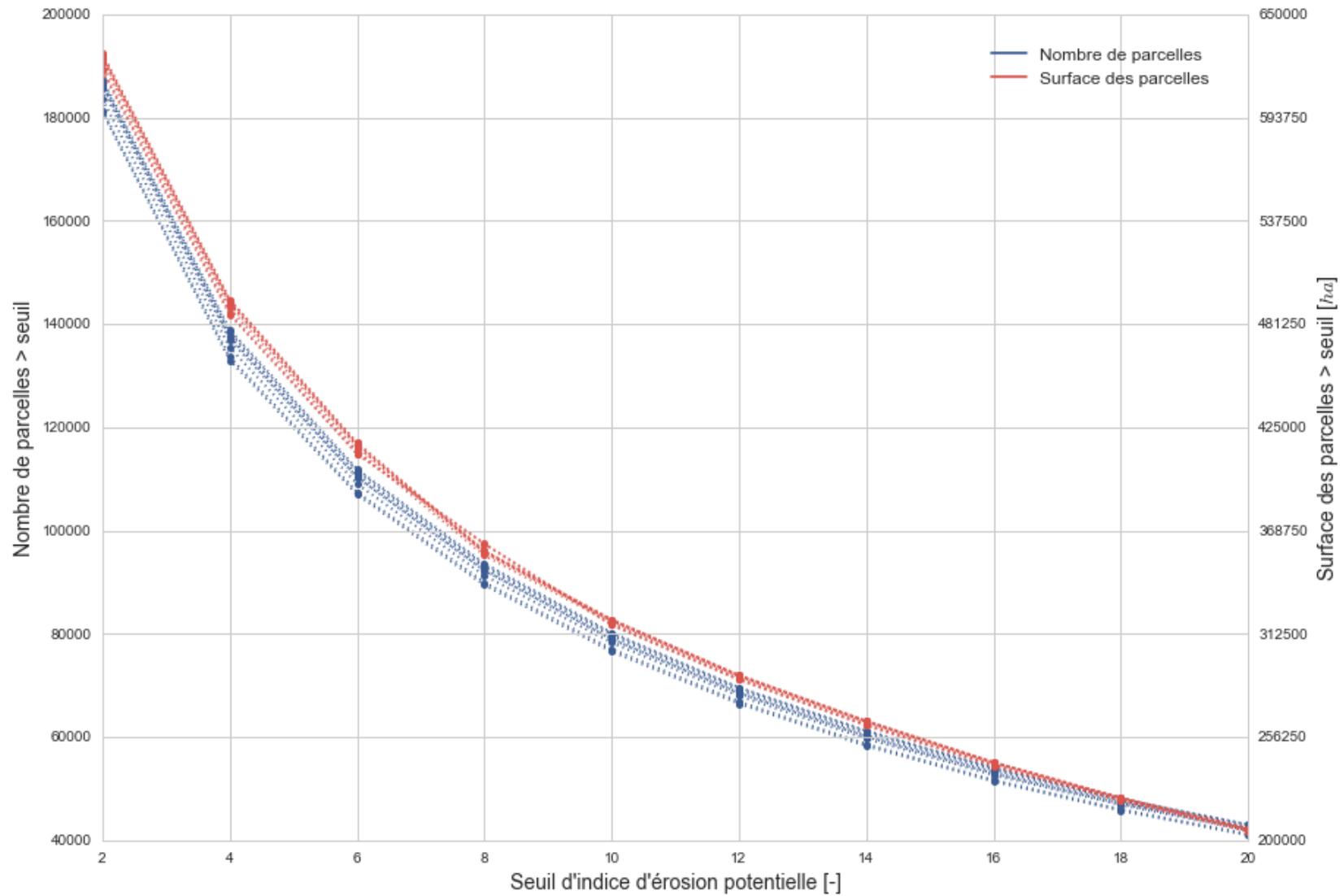


Figure 87 : NOMBRE DE PARCELLES ET SURFACE AGRICOLES À RISQUE POUR DIFFÉRENTS SEUILS D'IEP (2008-2015)

7.8. Conclusion et perspectives

La cellule GISER veille à développer des indicateurs plus réalistes du point de vue environnemental, mesurables en tout point de la Wallonie, fiables et robustes dans le temps et dans l'espace pour l'estimation du risque d'érosion parcellaire. Bien qu'inégalés en la matière, en raison des limites de calcul, de la nature des données et de leur résolution, des choix méthodologiques, ces indicateurs restent imparfaits. Ces limites peuvent se traduire en complications pour les agriculteurs ou les services publiques en cas de litiges.

Le travail réalisé optimise le code et pérennise son utilisation. Si des efforts se poursuivent dans ce sens il n'est pas improbable que le code R GISER puissent être évalué sur des données à haute résolution tel que le LIDAR, améliorant ainsi l'estimation des surfaces, des pentes et diminuant ainsi l'incertitude lié à l'imprécision de la donnée source.

En guise de première étape à l'anticipation des problèmes liés à l'indicateur, ce travail propose une analyse exploratoire incluant une série de tests permettant l'identification de problèmes. Cette identification ouvre la porte à une réflexion sur leur solution, en collaboration avec les responsables SIGEC. En particulier, cette collaboration est d'autant plus importante que l'acquisition des données SIGEC est longue et que ce travail a dû se contenter de données de projets précédents. La non harmonisation des attributs et l'absence de métadonnées rend la tâche et l'effort d'interprétation de l'ingénieur plus difficile et incertaine si la couche officieuse utilisée n'est pas valide.

La liste des problèmes identifiés n'est pas forcément exhaustive et de nouveaux problèmes peuvent être identifiés à l'avenir. L'analyse qualitative exploratoire doit à la fois devenir une pratique systématique lors de la mise à jour de la cartographie mais aussi être continuellement réfléchi et améliorée pour faciliter l'identification et la discrimination des problèmes.

L'analyse surfacique réalisée reste sommaire et se limite à la distribution surfacique des parcellaires. Toutefois, l'analyse de l'évolution de la géométrie et de la taille des parcelles reste intéressante car c'est ce qui va conditionner des changements dans les indicateurs développés.

En ce qui concerne le code R GISER, il apparaît que le nombre de parcelles et les superficies concernées évoluent peu d'une année à l'autre. Le seuil d'EP de 120 T.ha⁻¹.an⁻¹ permet de sélectionner un nombre équivalent de parcelles que le code R10, tout en ciblant des parcelles ayant en moyenne des taux d'érosion plus élevés. L'utilisation d'un IEP de 18 permettrait également de cibler un nombre équivalent de parcelles que le code R10 actuel.

7.9. Annexes

Annexe 1 : Attributs des parcelles SIGEC

Annexe 2 : Description des livrables

Annexe 1 : Attributs des parcellaires SIGEC

- 2008

nom	alias	type	longueur
OBJECTID	OBJECTID	OID	4
Shape	Shape	Geometry	0
ID	ID	Integer	4
Code_Obj	Code_Obj	String	16
Prd_nmr	Prd_nmr	String	14
Cmp_cod	Cmp_cod	String	4
Prc_nmr	Prc_nmr	SmallInteger	2
Prc_id	Prc_id	String	10
Area	Area	Double	8
Perimetre	Perimetre	Double	8
X_ref	X_ref	Double	8
Y_ref	Y_ref	Double	8
Cult_cod	Cult_cod	String	5
Cult_lib	Cult_lib	String	254
Shape_Leng	Shape_Leng	Double	8
Shape_Length	Shape_Length	Double	8
Shape_Area	Shape_Area	Double	8

- 2009

nom	alias	type	longueur
OBJECTID	OBJECTID	OID	4
Shape	Shape	Geometry	0
REF_ID	REF_ID	Integer	4
CAMPAGNE	CAMPAGNE	SmallInteger	2
PRD_NMR	PRD_NMR	String	254
PRC_NMR	PRC_NMR	Double	8
CULT_COD	CULT_COD	String	254
CULT_LIB	CULT_LIB	String	254
X	X	Integer	4
Y	Y	Integer	4
AREA_ha	AREA_ha	Double	8
ATTR_R10	ATTR_R10	String	254
ATTR_R15	ATTR_R15	String	50
ATTR_N	ATTR_N	String	50
ATTR_V	ATTR_V	String	50
ATTR_S	ATTR_S	String	50
ATTR_C	ATTR_C	String	50
ATTR_G	ATTR_G	String	50
ATTR_P	ATTR_P	String	50
ATTR_B	ATTR_B	String	50
Presence_M	Presence_M	String	10
Type_MAE	Type_MAE	String	100

M1a_M	M1a_M	Double	8
M1b_NBRE	M1b_NBRE	Double	8
M1c_NBRE	M1c_NBRE	Double	8
M2_Ha	M2_Ha	Double	8
M3a_M	M3a_M	Double	8
M3b_M	M3b_M	Double	8
M4_Ha	M4_Ha	Double	8
M5_Ha	M5_Ha	Double	8
M7_Ha	M7_Ha	Double	8
M8_Ha	M8_Ha	Double	8
M9_M	M9_M	Double	8
Shape_Leng	Shape_Leng	Double	8
pct	pct	Double	8
R	R	SmallInteger	2
Shape_Length	Shape_Length	Double	8
Shape_Area	Shape_Area	Double	8

- 2010

nom	alias	type	longueur
OBJECTID	OBJECTID	OID	4
Shape	Shape	Geometry	0
REF_ID	REF_ID	Double	8
ANNEE	ANNEE	Integer	4
PRD_NMR	PRD_NMR	String	12
PRC_NMR	PRC_NMR	Integer	4
CULT_COD	CULT_COD	Integer	4
CULT_LIB	CULT_LIB	String	254
AREA_Ha	AREA_Ha	Double	8
Presence_M	Presence_M	String	50
M1a_M	M1a_M	Double	8
M1b_NBRE	M1b_NBRE	Double	8
M1c_NBRE	M1c_NBRE	Double	8
M2_Ha	M2_Ha	Double	8
M3a_M	M3a_M	Double	8
M3b_M	M3b_M	Double	8
M4_Ha	M4_Ha	Double	8
M5_Ha	M5_Ha	Double	8
M7_Ha	M7_Ha	Double	8
M8_Ha	M8_Ha	Double	8
M9_M	M9_M	Double	8
VERSION	VERSION	String	30
Shape_Leng	Shape_Leng	Double	8
Shape_Length	Shape_Length	Double	8
Shape_Area	Shape_Area	Double	8

- 2011

nom	alias	type	longueur
OBJECTID	OBJECTID	OID	4
Shape	Shape	Geometry	0
REF_ID	REF_ID	Double	8
CAMPAGNE	CAMPAGNE	String	4
CULTURE	CULTURE	String	5
Shape_Leng	Shape_Leng	Double	8
Shape_Le_1	Shape_Le_1	Double	8
R10	R10	Integer	4
R15	R15	Integer	4
Shape_Length	Shape_Length	Double	8
Shape_Area	Shape_Area	Double	8

- 2012

nom	alias	type	longueur
OBJECTID	OBJECTID	OID	4
Shape	Shape	Geometry	0
CMP_COD	CMP_COD	String	4
CULT_COD	CULT_COD	String	5
TEXT_	TEXT_	String	254
CODE_PENTE	CODE_PENTE	String	10
Shape_Leng	Shape_Leng	Double	8
Shape_Length	Shape_Length	Double	8
Shape_Area	Shape_Area	Double	8

- 2013

nom	alias	type	longueur
OBJECTID	OBJECTID	OID	4
Shape	Shape	Geometry	0
CMP_COD	CMP_COD	String	4
CULT_COD	CULT_COD	String	5
TEXT	TEXT	String	254
CODE_PENTE	CODE_PENTE	String	10
Shape_Length	Shape_Length	Double	8
Shape_Area	Shape_Area	Double	8

- 2014

nom	alias	type	longueur
OBJECTID	OBJECTID	OID	4
Shape	Shape	Geometry	0
REF_ID	REF_ID	Double	8

PR_ID	PR_ID	String	5
PRT_TYPE	PRT_TYPE	String	3
PRD_NMR	PRD_NMR	String	14
PRC_NMR	PRC_NMR	SmallInteger	2
CAMPAGNE	CAMPAGNE	String	4
CULTURE	CULTURE	String	6
CULT_NOM	CULT_NOM	String	255
COUVERT	COUVERT	String	30
SURF_HA	SURF_HA	Double	8
Shape_Length	Shape_Length	Double	8
Shape_Area	Shape_Area	Double	8

- 2015

nom	alias	type	longueur
OBJECTID	OBJECTID	OID	4
Shape	Shape	Geometry	0
REF_ID	REF_ID	Double	8
PR_ID	PR_ID	String	5
PRT_TYPE	PRT_TYPE	String	3
PRD_NMR	PRD_NMR	String	14
PRC_NMR	PRC_NMR	SmallInteger	2
CAMPAGNE	CAMPAGNE	String	4
CULTURE	CULTURE	String	6
CULT_NOM	CULT_NOM	String	255
COUVERT	COUVERT	String	30
SURF_HA	SURF_HA	Double	8
Shape_Length	Shape_Length	Double	8
Shape_Area	Shape_Area	Double	8

Annexe 2 : Description des livrables

La structure du dossier « livrables » est représentée à la Figure 88. Celui-ci contient, tous les codes, données et résultats en lien avec la mise à jour de la cartographie de l'érosion parcellaire. Le dossier est accompagné d'un fichier « xmind » expliquant le format, le contenu et l'utilité de chaque fichier.

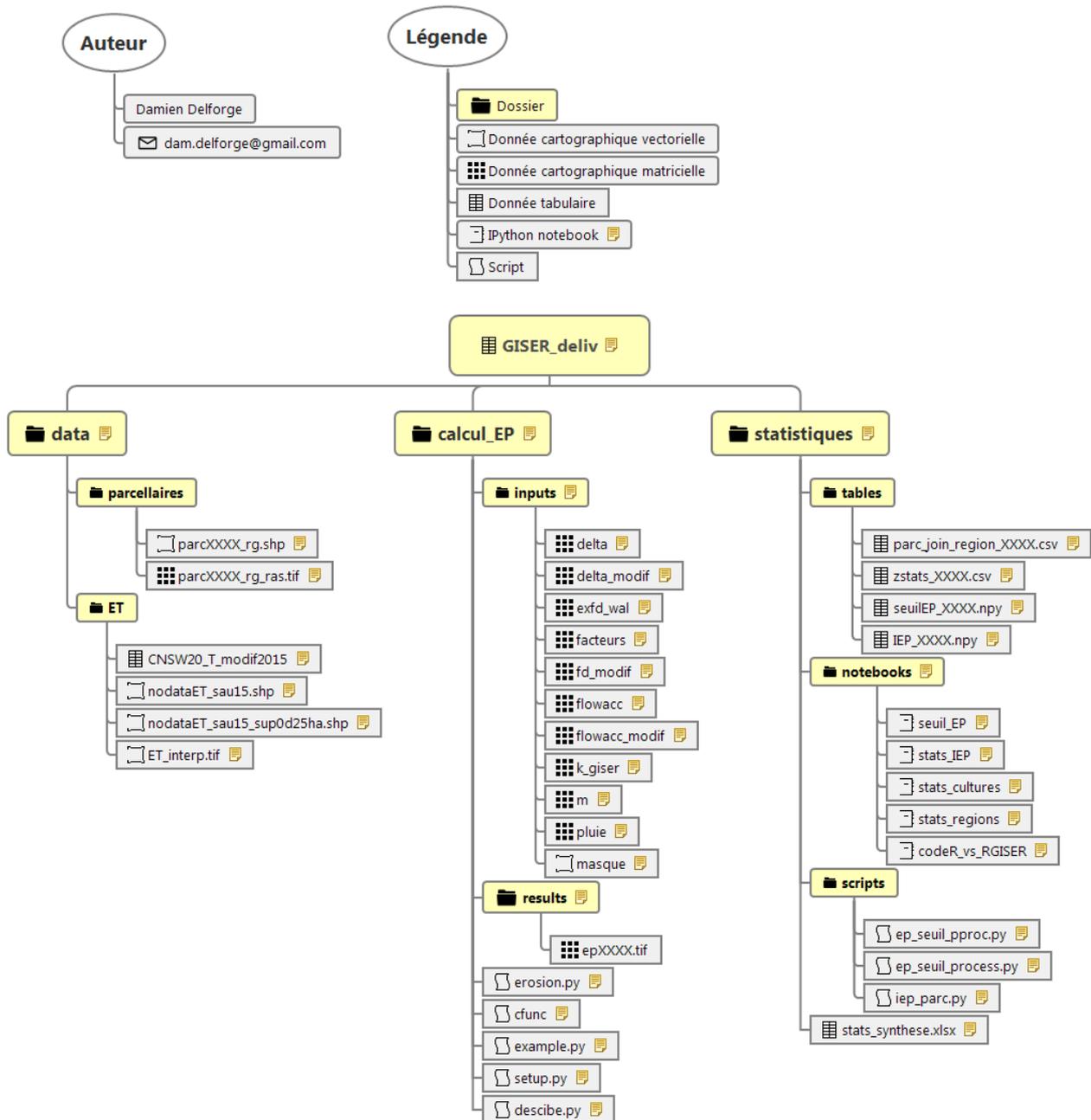


Figure 88 : Description de la structure des livrables

Renforcement de la capacité des communes à gérer et prévenir les événements de coulées boueuses

Contenu

Analyse des SIGISER

Formation des acteurs communaux

Permis d'urbanisme et inondation par ruissellement d'origine agricole

Code de Bonnes Pratiques

Guide de bonnes pratiques

8. Analyse des SIGISER

Cette section est présentée ici sous forme de résumé non-technique. Une description détaillée des méthodes et résultats est disponibles dans une fiche résultat en annexe :

Fiche résultat : GISER_expertise_chiffres

8.1. Remise d'avis techniques

La question posée

La convention cadre contenait l'objectif suivant : « La cellule GISER devrait être le lieu de rencontre réel et/ou virtuel entre l'ensemble des acteurs concernés par les dommages liés aux risques érosifs ou de ruissellement et les experts et conseillers de terrain qui peuvent contribuer à limiter ce risque. Les données recueillies au travers de la cellule seront systématiquement recensées dans une base de données SIGISER.

La démarche générale utilisée lors de la remise d'avis technique consiste tout d'abord en l'analyse cartographique de la zone concernée ce qui permet de formuler un premier diagnostic qui sera ensuite validé par une visite de terrain. Le rapport fourni au demandeur reprend le diagnostic complet ainsi que des propositions d'aménagement spécifique ainsi que des recommandations plus générales. L'animation d'une séance d'information et/ou de présentation du rapport est également proposée au demandeur en fonction des besoins. La cellule reste ensuite disponible pour assurer le suivi notamment pour évaluer la pertinence et l'efficacité des aménagements mis en place. Cette manière de fonctionner est susceptible de différer et d'évoluer selon les cas à traiter. »

Le résultat actuel

Depuis septembre 2011, selon la démarche, les chiffres sont les suivants :

- Demandes : 106 demandes provenant de 93 communes, soit 29 demandes par an ;
- Réunions : 47 jours calendrier en moyenne après la date de demande ;
- Rapports :
 - o environ 500 sites étudiés, soit environ 4 sites par communes ;
 - o temps d'attente : 92 jours calendrier en moyenne après la date de réunion à la commune.
- Concertations :
 - o Réunions de lancement de concertation : 29 communes ;
 - o Concertations : 37 communes.
- Mises en œuvre d'aménagements :
 - o 178 aménagements réalisés sur 28 communes :
 - 19,5 km d'aménagements linéaires : bandes enherbées, fascines, talus, fossé, fossé-talus, fossé à redents.

La Figure 89 montre les communes actives avec GISER en Wallonie.

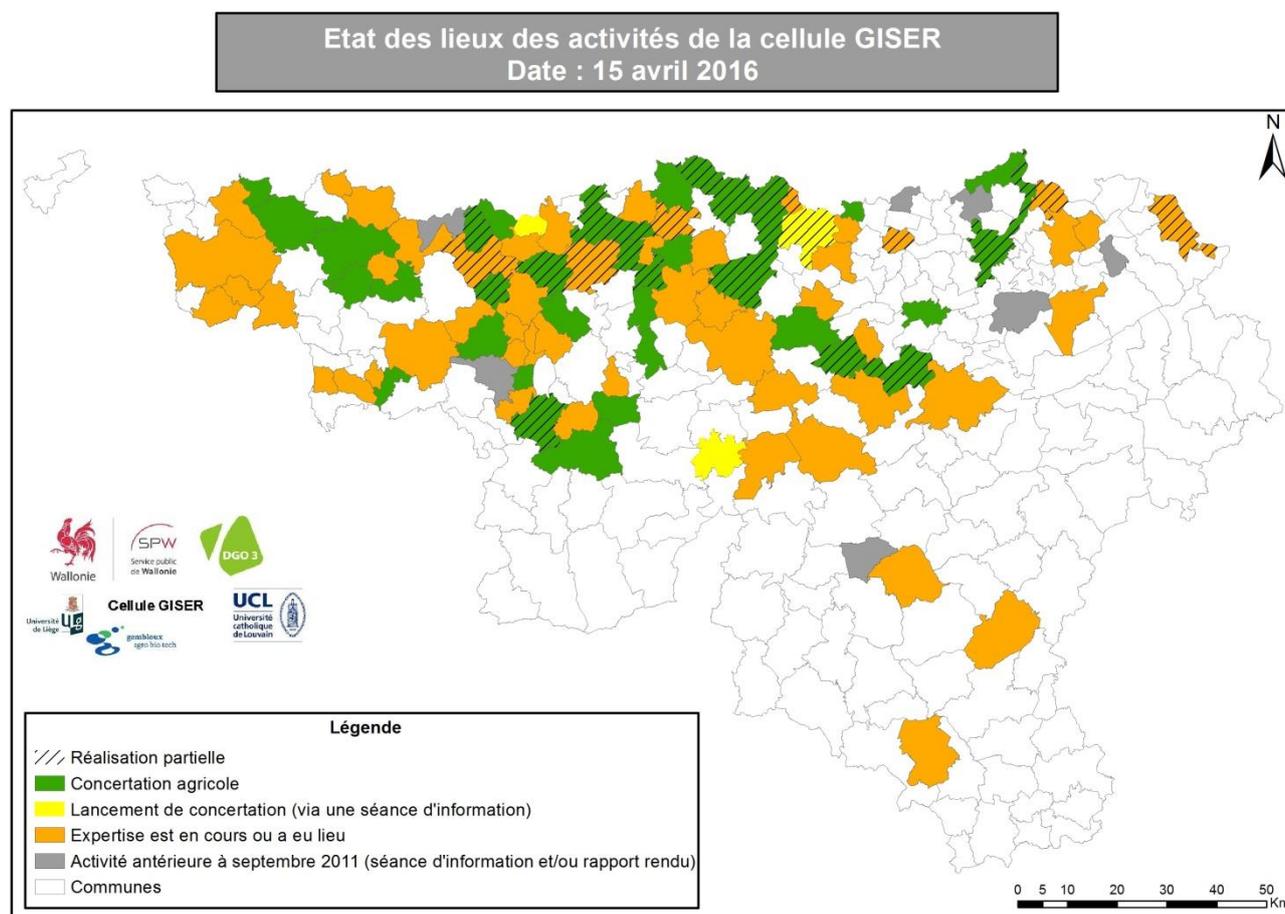


Figure 89 : ÉTAT DES LIEUX DE L'ACTION EXPERTISE DE GISER EN FIN DE CONVENTION-CADRE 2011-2015

Les perspectives

Enfin, une veille technique sera assurée. Elle visera à proposer des aménagements plus variés, allant de la conservation des sols à l'échelle parcellaire jusqu'à des mesures palliatives de filtrage et de conduite des eaux boueuses et à quantifier leur efficacité intrinsèque et au sein d'un ensemble d'aménagements.



Figure 90 : POSITIONNEMENT D'UNE FASCINE PERPENDICULAIREMENT À LA PENTE AU MOYEN DU NIVEAU LASER

9. Formation des acteurs communaux

9.1. Permis d'urbanisme et inondation par ruissellement d'origine agricole

En novembre et décembre 2015, la Cellule GISER a organisé une formation à l'attention des communes de Wallonie sur la remise d'avis « urbanisme » en zone inondable par ruissellement d'origine agricole. La formation s'est déroulée dans les Services extérieurs de la DDR. Le bilan est très positif : plus de 320 participants représentant 155 communes, ainsi que les DGO2, DGO3, DGO4, Provinces et UVCW.

Contenu de la formation

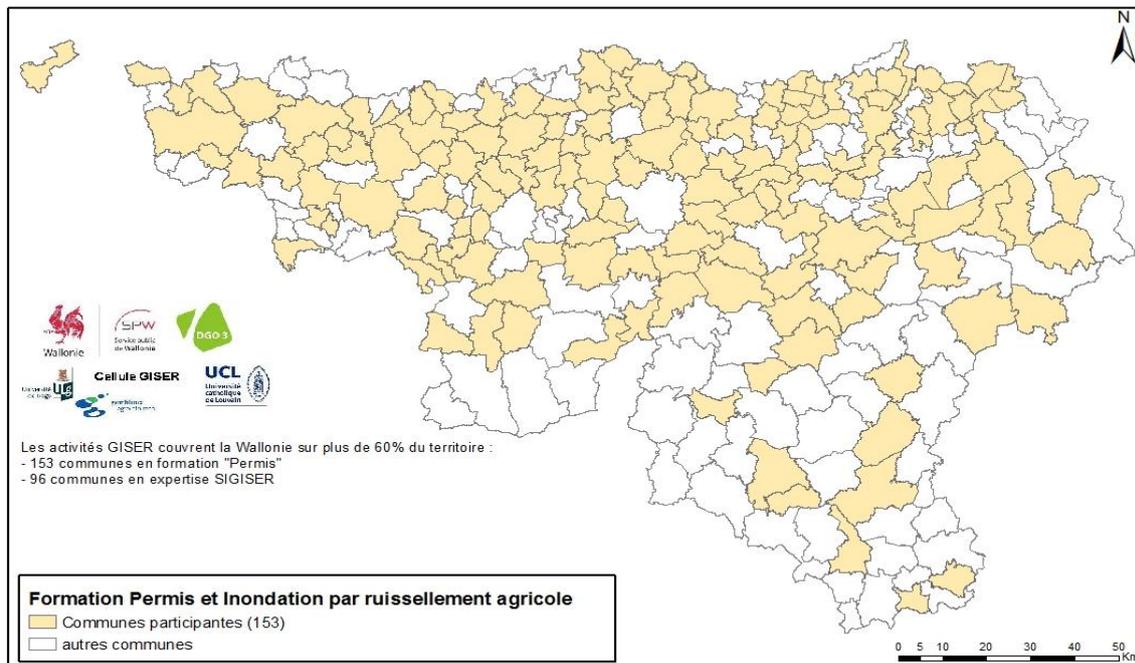
1. Rappel sur la gestion de la problématique INONDATIONS en Wallonie
 - GTI, PGRI, Gestionnaires CE (Cours d'Eau)
 - Ressources cartographiques
2. Avis DDR sur zone à risque de ruissellement
 - Procédure administrative, portée de l'avis
 - Méthode de construction de l'avis, 4 cas d'étude
3. Outils de gestion du risque
 - Services et subsides DAFOR/DDR-GISER, AGW 1997, AGW 2007
 - Exemples d'aménagements (privés, publics, agricoles)

Les documents présentés en séance sont téléchargeables sur le site www.giser.be (rubrique Documents GISER).

Questions et commentaires

1. Cartographie de l'aléa
 - Confusion débordement/ruissellement : la légende de l'application Inondation du Géoportail ne fait pas la distinction ; les phénomènes sont parfois mal connus
 - Cohérence carte/terrain : comment sont prises en compte les différences constatées entre le tracé des axes sur carte et les écoulements réels sur le terrain, et quelle est la procédure de mise à jour ?
 - Traduction « qualitative » des classes d'aléa : à quoi correspond potentiellement sur site un phénomène de ruissellement de type aléa « rouge » p.ex. ?
2. Procédure administrative
 - Problème des zones d'habitat où les axes sont profondément modifiés : qui est compétent pour avis ?
 - Fonctionnaire délégué (art. 129,...) : en cas de procédure de remise d'avis passant par le fonctionnaire délégué, GISER est-elle consultée d'office par le fonctionnaire délégué ou l'initiative de prendre avis auprès de GISER revient-elle à la commune ?

Communes en formation avec la Cellule GISER (nov-déc. 2015)



Suite à cette formation, l'Union des villes et communes de Wallonie a sollicité GISER pour donner une formation complémentaire le 19 avril 2016, en collaboration avec les services juridiques de l'UVCW.

La formation et ses conclusions ont été présentées au GT Inondations début janvier 2016.

Documents associés

http://www.giser.be/wp-content/uploads/2015/12/FormationSPW_PU_ruissellement_2015_1.zip

http://www.giser.be/wp-content/uploads/2015/12/FormationSPW_PU_ruissellement_2015_2.zip

9.2. Code de bonnes pratiques

Le Guide de bonnes pratiques (mars 2015) pour la gestion du risque de ruissellement est en cours de révision avec nos collègues des Directions DAFoR, DCENN, DEV. L'objectif est de l'étoffer par les expériences et aménagements de chacun pour ensuite le faire éditer par le SPW Editions.

Le Guide a été valorisé durant cette convention en diffusant des chapitres sous forme de fiches de travail au format .pdf auprès des communes, au gré de leurs besoins spécifiques : construction de fascines, implantation de dispositifs enherbés, de fossés-talus, etc.

D'autre part, une diffusion des conseils de bonne pratique pour la gestion du ruissellement sous forme de 3-4 petits montages vidéos, sur le principe des « Coins de champ virtuels », est en cours en avril 2016. Celles-ci serviront de test pour une éventuelle diffusion plus large des différentes techniques et méthodes pour la gestion des inondations par ruissellement par capsules vidéos, dans le cadre des futures activités de GISER.

Communication, vulgarisation, démonstration

Contenu :

Action auprès des agriculteurs

Visibilité et communication des résultats

Visites d'aménagements sur site

Séances d'information, conférences, cours

Articles scientifiques, posters

Media, presse

Appui aux politiques régionales

Remise d'avis sur permis et autorisations

10. Action auprès des agriculteurs

L'action auprès des agriculteurs a consisté en une série de séances d'information. Voir chapitre suivant.

11. Visibilité et communication des résultats

11.1. Visites d'aménagements sur site

17/02/2016, Visite des aménagements d'Ohey avec les étudiant de la haute Ecole Charlemagne, 10-15 personnes.

28/3/2016, Visite d'aménagements à Ohey, grand public et autorités communales, 15 personnes.

11.2. Séances d'information, conférences, cours

24/04/2015, Visite BV Giser étudiant Ulg : cours à option G. Colinet, édophalogie-pédophalogie. Chastre (Héவில்), 20 personnes.

24/06/2015, Midi de la biomasse, organisé par Valbiom. " Erosion et agriculture : le point en Wallonie", 20-25 personnes.

06/11/2015, Visite de terrain, cours de géomorphologie expérimentale, UCL, 20 étudiants.

13/11/2015, Cours étudiants Bio ingénieurs UCL. LLN, 6 personnes.

Novembre – décembre 2015, 13 séances de formation « Permis d'urbanisme et inondations par ruissellement d'origine agricole » pour les communes. Ath, Libramont, Thuin, Wavre, Malmédy, Ciney, Huy et Jambes. Environ 320 personnes.

11/01/2016, Soirée d'information organisée par le GARA du PNPE. "Le sol, un capital à préserver", 35-40 personnes.

21/01/2016, La structure des sols, coopérative Cerema, France, +/-250 personnes.

28/01/2016, Réunion d'information organisée par la commune de Herve, thème « L'agriculture de conservation », 10 à 15 personnes.

16/02/2016, Soirée d'information organisée par la commune de Sombreffe. « Lutter contre les coulées boueuses », 20 personnes.

3 fois du 18 février au 20 avril 2016, Jeu de rôle, cours de conservation des sols, UCL, 10 étudiants.

23/2/2016, Conférence « Coulées de boue : l'agriculture comme solution ? », Collège des producteurs, Mons, 65 personnes.

23/2/2016, Réunion d'information « Inondations par ruissellement : quelles solutions, quels outils pour les communes », Contrat Rivière Hoyoux. Clavier, 20 personnes.

29/2/2016, Conférence « Coulées de boue : l'agriculture comme solution ? », Collège des producteurs, Namur, 45 personnes.

03/03/2016, Soirée d'information organisée par le Parc Naturel du Pays des collines. « Le sol, ce capital qui s'érode ! Comment lutter contre son érosion ? », 10 personnes.

08/03/2016, Journée d'échanges organisée par le RMT Biomasse, "Les cultures BIOMASSE; un atout pour lutter contre l'érosion des sols?", 25 personnes.

24/3/2016, Formation conseillers Natagriwal, Namur, Courrière, 26 personnes.

19/4/2016, Journée d'étude « Communes, agriculteurs et citoyens face aux coulées de boue », Union des villes et communes de Wallonie, Namur.

11.3. Articles scientifiques, posters

29/11/2015, Midi de rencontre étudiants-chercheurs, organisé par l'A-cube et la Faculté des bioingénieurs (UCL), Poster « Identification des parcelles agricoles à risque d'érosion pour protéger les infrastructures publiques et privées », 50 personnes.

13/04/15 - 17/04/15, Présentation orale : "Diachronical soil surveys: a way to quantify long term diffuse erosion". EGU General Assembly 2015, 100 personnes.

18/06/2015, Présentation orale: Contribution à l'étude de la distribution spatiale des zones d'érosion et de ruissellement sur un bassin versant. INRA Rennes Agrocampus Ouest. 15 personnes.

10/12/2015, Poster journée jeune chercheur "GISER: Integrated management of Sol-Erosion-Runoff". Gembloux ABT Senghor, 100 personnes.

11.4. Media, presse

23/2/2016, Interview RTBF radio, journal régional Liège.

25/02/2016, Reportage pour MaTélé « agriculture : trois moyens pour lutter contre l'érosion » <http://www.matele.be/lutter-l-erosion-et-les-coulees-de-boue>

01/04/2016, Article dans le Sillon belge

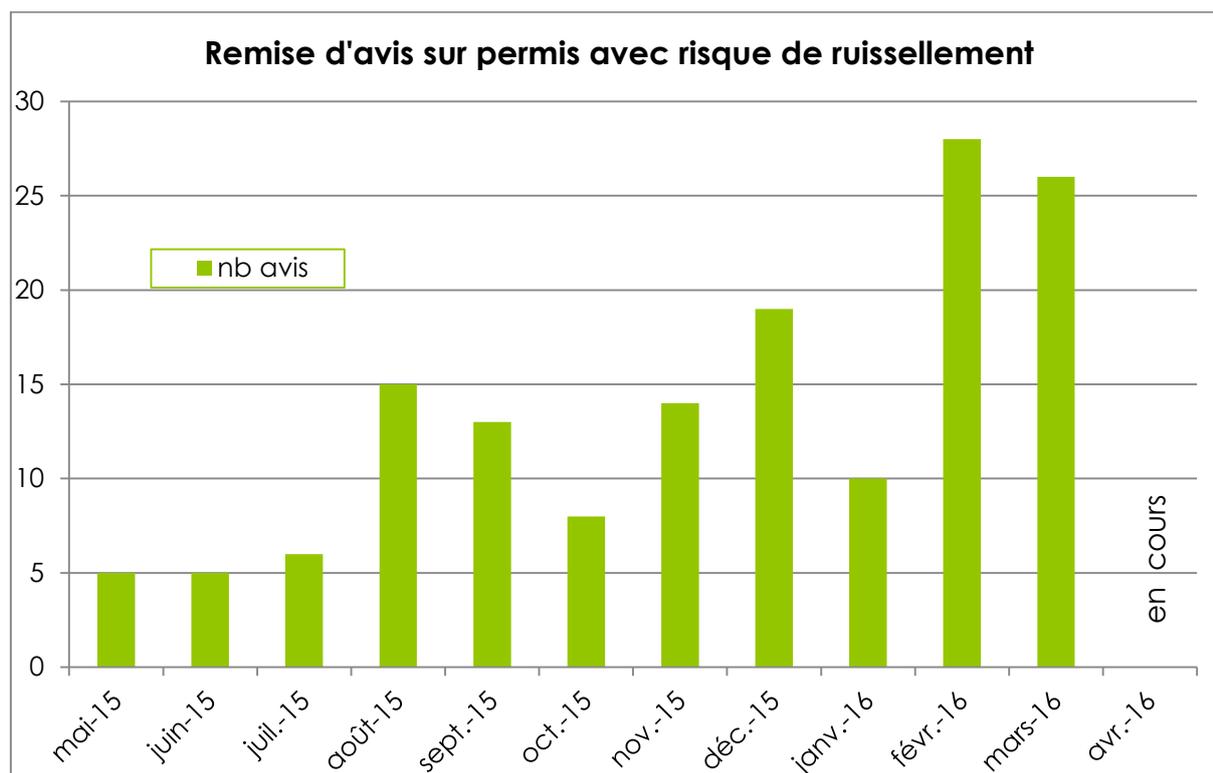
Mise à jour périodique du site internet www.giser.be

12. Appui aux politiques régionales

12.1. Remise d'avis sur permis et autorisations

Entre mai 2015 et mars 2016, la Cellule GISER a remis 149 avis sur les permis d'urbanisme, d'urbanisation et autres types de permis où la problématique du ruissellement entre en jeu.

Le nombre de demandes est en augmentation quasi constante.



La Cellule contribue, par son expertise, à l'amélioration continue des procédures sur les remises d'avis au sein de la DDR. Elle participe également à des réunions inter-services sur le sujet.