
Quels modes de gestion des sols permettent de réduire l'apport en sédiments? Modélisations et applications au bassin versant de la Meuse

Auteur : Urbain, Cindy

Promoteur(s) : Degré, Aurore; 2885

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3092>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Quels modes de gestion des sols permettent de réduire l'apport en sédiments? Modélisations et applications au bassin versant de la Meuse

CINDY URBAIN

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2016-2017

(CO)-PROMOTEUR(S): PR. AURORE DEGRÉ – SAMUEL VANDER LINDEN (CONTRAT RIVIÈRE MEUSE AVAL)

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

Quels modes de gestion des sols permettent de réduire l'apport en sédiments? Modélisations et applications au bassin versant de la Meuse

CINDY URBAIN

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2016-2017

(CO)-PROMOTEUR(S): PR. AURORE DEGRÉ – SAMUEL VANDER LINDEN (CONTRAT RIVIÈRE MEUSE AVAL)

Remerciement

Je voudrais commencer par remercier mes deux promoteurs, Aurore Degré et Samuel Vander Linden pour leur aide, leurs informations et leurs conseils à chaque étape de la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais également remercier Catherine Sohier, Stéphane Becquevort et l'ensemble du personnel de l'unité eau-sol-plante qui m'ont permis d'obtenir les moyens techniques et les informations nécessaires à mon travail.

Un grand merci également à l'ensemble des conseillers communaux et à Pierre Demarcin qui ont pris le temps de répondre à mes questions et m'ont fourni toutes les données utiles à la réalisation de l'inventaire de terrain.

Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe du BRGM d'Orléans et en particulier Olivier Cerdan et Valentin Landemaine pour leur accueil, leurs informations et le temps qu'ils m'ont accordé.

Un merci à Hadrien Gullet du Pays Burdinale Mehaigne avec qui j'ai pu m'entretenir et dont les idées m'ont permis d'accroître ma réflexion.

Je voudrais remercier également Matthieu et sa famille pour les nombreuses relectures et leurs avis qui m'ont donné la possibilité d'améliorer ma rédaction.

Un grand merci à ma famille et à mes amis pour leur soutien et leurs conseils tout au long de ces merveilleuses années.

Et, finalement, je voudrais remercier tout particulièrement mes parents pour leur relecture, leur soutien et la patience dont ils ont fait preuve depuis le début de ce mémoire.

Résumé

L'érosion des sols est un phénomène qui prend une importance grandissante au sein de la ceinture loessique. Cette érosion a des conséquences économiques sérieuses au sein de parcelles agricoles comme dans les zones d'habitation. Sur le bassin versant de la Meuse, divers facteurs influencent celle-ci notamment la pédologie et l'occupation du sol. Bien que les loess, largement majoritaires, soient sensibles à ce phénomène, la principale cause d'érosion est l'agriculture avec 80 % de la superficie totale du bassin versant.

L'érosion des sols a également des impacts écologiques conséquents. La moule épaisse (*Unio Crassus*) est une espèce protégée présente dans la Meuse et ses affluents, dont les conditions de vie sont altérées par le colmatage du lit de ces cours d'eau. La détermination des zones qui subissent le plus l'érosion et qui en conséquence, ont des apports plus importants de sédiments à l'endroit de l'exutoire, est une première étape dans la préservation de cette espèce.

Les résultats obtenus par le modèle WATERSED montrent que peu de zones problématiques pour chacun des événements pluvieux sélectionnés sont présentes au sein de ce bassin versant. Un changement de pratiques agricoles pour l'ensemble des parcelles semble le plus impératif pour la préservation de cette espèce.

Abstract

Soils erosion is becoming increasingly important in the loess belt. This phenomenon can have economic consequences inside agricultural parcels and housing estates. On the Meuse catchment, various factors influence it, like pedology or land use. Although loess are sensitive to erosion processes, the most important cause of erosion is the agriculture with 80 % of the global catchment area.

Soils erosion can also have important ecological consequences. The pearl mussel (*Unio Crassus*) is a protected species that live in the Meuse and its tributaries. Their living situations are endangered by the sealing of the riverbed. The determination of the most eroded areas in the catchment is the first step to preserve this specie.

The obtained results by the WATERSED model show a few problematic areas in this catchment for each selected rainy events. A change in the agricultural practices on the entire parcels seems to be the more adapted solution for the conservation of this specie.

Table des matières

Résumé.....	v
Abstract.....	v
1. Contexte général.....	1
2. Introduction.....	2
a. Concepts-clés de l'érosion.....	6
b. Types d'érosion :	6
c. Facteurs influençant l'érosion :.....	9
3. Matériels et méthodes.....	11
a. Description du bassin versant.....	11
b. Patrimoine et organisation du bassin versant	20
c. Procédure de l'inventaire terrain.....	21
d. Modèles utilisés	21
e. Données d'entrées des modèles.....	25
4. Résultats et discussion	30
a. Inventaire de terrain	30
b. Quantification de la perte en sol.....	34
• <i>Observations générales</i>	34
• <i>Comparaison des zones entre saisons</i>	37
• <i>Comparaison de l'approche parcellaire et bassin versant</i>	38
• <i>Comparaison des modèles USLE ou MUSLE avec le modèle Watersed</i>	40
c. Connectivité hydrologique.....	43
d. Zone à risques sur le bassin versant.....	45
e. Choix des données d'entrée	49
f. Analyse de sensibilité des paramètres d'entrées	53
5. Propositions d'actions prioritaires	54
6. Perspectives.....	57
7. Conclusions.....	60
8. Bibliographie.....	61
a. Référence internet	61
b. Référence Bibliographique	61
9. Annexes	66
a. Fonctionnement de WATERSED.....	66

b.	Liste des fichiers de sortie du modèle WATERSED.....	70
c.	Code de classification des principaux types de sols.....	70
d.	Spatialisation du Code_up sur le bassin versant de la Mehaigne.....	71
e.	Distance (m) entre les stations de mesure de débit et météorologique, valeurs des coefficients a et de Thiessen.	71
f.	Données de précipitation entrées dans le modèle WATERSED.....	72
g.	Périodes de retour pour chaque événement sélectionné.....	72
h.	Attribution des différents code C-R-F pour chaque Code_up.....	72
i.	Capacité d'infiltration pour chaque Code_up.....	74
j.	Concentration en sédiment pour chaque code_up en fonction de la saison et de l'intensité maximale des pluies.....	75
k.	Valeur des coefficients d'imbibition en fonction de la capacité d'infiltration et du cumul des pluies sur les 48h précédentes.....	80
l.	Valeur des coefficients de Manning par saison pour chacun des codes_up.....	80
m.	Connectivité hydrologique pour les parcelles de 10, 100, 200 et 400m.	82
n.	Spatialisation du CODE_UP pour les 3 zones prioritaires déterminées sur le bassin versant de la Mehaigne.....	84

Tables

1. figures

Figure 1 : Évolution mensuel de l'érosivité annuelle (Verstraeten et al., 2006)	4
Figure 2 : Déplacement des particules de sol en fonction de la pente	8
Figure 3 : Classification du réseau hydrographique sur le bassin versant de la Meuse	12
Figure 4 : Localisation des différentes communes au sein du bassin versant de la Meuse	13
Figure 5 : Pourcentage de pente sur le bassin versant de la Meuse	14
Figure 6 : représentation du relief sur le bassin versant de la Meuse	14
Figure 7 : Carte des sols simplifiés au sein du bassin versant de la Meuse	16
Figure 8 : Répartition des masses d'eau sur le bassin versant de la Meuse	18
Figure 9 : Répartition des différents types de cultures principales présentes sur le bassin versant en 2015(SPW, 2016)	19
Figure 10 : Zone natura 2000, positions des frayères et limite de l'envasement sur le bassin versant de la Meuse	20
Figure 11 : Représentation des différentes données prises en compte pour la connectivité hydrologique	24
Figure 12 : Localisation des différentes informations récoltées auprès des communes et de la cellule GISER	33
Figure 13 : Comparaison de l'érosion diffuse et concentrée avec les courbes de niveau pour l'événement 4	35
Figure 14 : Comparaison de l'érosion diffuse et concentrée avec le parcellaire agricole pour l'événement 4	35
Figure 15 : Erosion et dépôts nets pour l'événement 4 sur le bassin versant de la Meuse	36
Figure 16 : Comparaison des zones d'érosion diffuse de l'événement 4 avec la pente et le contour du parcellaire agricole	39
Figure 17 : Comparaison des zones d'érosion concentrée de l'événement 4 avec une ortho-image de l'année 2015	41
Figure 18 : Comparaison de la carte d'erruissol (érosion concentrée) avec les zones d'érosion concentrée déterminées pour l'événement 4	41
Figure 19 : Erosion et dépôts net ainsi que l'excédent de pluie au niveau des aléas d'inondation de la commune de Wasseiges	42
Figure 20 : Indice de connectivité pondéré par la rugosité sur le bassin versant de la Meuse	43
Figure 21 : Indice de connectivité pondéré par le facteur cultural - parcelle de 50 m	44
Figure 22 : Comparaison de l'indice de connectivité avec l'érosion diffuse brute sur un sous bassin versant de la Meuse	45
Figure 23 : Comparaison de la première zone prioritaire avec le tracé du parcellaire agricole et les courbes de niveau	46
Figure 24 : Comparaison de la deuxième zone prioritaire avec le tracé du parcellaire agricole et les courbes de niveau	47
Figure 25 : Comparaison de la troisième zone prioritaire avec le tracé du parcellaire agricole et les courbes de niveau	48
Figure 26 : Localisation des trois zones prioritaires sur le bassin versant de la Meuse	48

2. Tableaux

Tableau 1: code d'occupation des sols (Landemaine, 2016).....	22
Tableau 2 : Code de classification en fonction de la nature pédologique	22
Tableau 3 : Classe de valeur pour le couvert végétal (Souchère, 2005).	27
Tableau 4 : Classe de valeur pour la rugosité (Souchère, 2005).....	27
Tableau 5 : Correspondance entre l'état du sol et le faciès (Souchère, 2005).....	27
Tableau 6 : Classification des valeurs de concentration en sédiment en fonction de la valeur maximale de précipitation sur une heure	28
Tableau 7 : Classification en fonction du cumul de précipitation sur les 48h précédentes.....	28
Tableau 8 : Recensement rapports Giser rendu sur le bassin versant de la Mehaigne.....	30
Tableau 9 : Inventaire des aléas d'inondations recensés sur le bassin versant de la Mehaigne.....	30
Tableau 10 : recensement des mesures antiérosives installées ou prévues sur le bassin versant de la Mehaigne	32
Tableau 11: Comparaison des quantités modélisées pour les différents types d'érosion et de dépôts pour chacun des événements	37
Tableau 12 : Quantité moyenne d'érosion diffuse brute par événement pour cinq occupations de sol	37
Tableau 13 : Quantité moyenne d'érosion concentrée brute par événement pour cinq occupations de sol.....	37
Tableau 14 : Quantité de sédiments modélisés pour différentes quantités de matière en suspension	53

1. Contexte général

L'érosion des sols est un phénomène qui a une place grandissante dans l'ensemble des zones cultivées. Le nombre de coulées boueuses et d'inondations qui se sont produites a une tendance à l'augmentation et les dégâts suivent la même croissance. Le monde agricole a connu beaucoup de changement depuis plusieurs décennies, afin d'augmenter les rendements et faciliter la vie des agriculteurs. L'ensemble de ces changements ont eu un impact économique, social et environnemental.

Parmi les nombreux impacts, la problématique de l'envasement des cours d'eau est traitée dans le cadre de ce mémoire. Celui-ci se produit lorsque des particules quittent les versants et les berges, se retrouvent dans le cours d'eau et colmatent le lit de celui-ci. Ce phénomène est dû à la charge trop élevée en sédiments pour la capacité de transport de la rivière. Le colmatage qui en résulte peut également avoir des conséquences sur les diverses espèces natives de ce milieu.

La mulette épaisse (*Unio Crassus*) est une espèce protégée qui vit dans la Meuse et ses affluents. Cette espèce fraye dans les lits rocaillieux, qui sont également l'endroit de prédilection pour le développement des juvéniles. Dans le but de préserver l'ensemble des espèces, plusieurs frayères ont été réaménagées dans la Meuse et, un suivi de celles-ci indique un retour progressif du colmatage. Afin de diminuer les apports en sédiments, une étude des pertes en sol sur l'ensemble du bassin versant de la Meuse est réalisée dans l'optique de prioriser l'installation de différentes mesures antiérosives ainsi que le conseil auprès des différents agriculteurs concernés.

La démarche de ce mémoire se compose de six parties. Tout d'abord, une explication des concepts-clés nécessaires à la quantification des phénomènes sera réalisée. Ensuite, la zone d'étude sera présentée ainsi qu'une explication des différentes modélisations utilisées. Un recensement des aléas d'inondations et des coulées boueuses sera détaillé dans cet exposé avant une analyse et une discussion des résultats obtenus par modélisation. Ce mémoire se terminera par des propositions d'aménagement en relation avec les résultats ainsi qu'une conclusion et des perspectives futures.

2. Introduction

Depuis plusieurs décennies, la population mondiale connaît une croissance notable qui se reflète sur chacun des continents. Et la Belgique n'échappe pas à la règle avec une population en augmentation de 0,07 %, soit 765 528 personnes de plus entre 2006 et 2016 (be.stat, s.d.). Cette augmentation démographique se traduit par une nécessité croissante en surface habitable, mais également par une augmentation du besoin en nourriture. La mondialisation du marché agricole a augmenté le nombre de variété de fruits et de légumes disponible dans les pays urbanisés. Dès lors, l'intensification des pratiques agricoles dans le monde a dû se poursuivre afin de conserver les possibilités de consommation de chacun. Dans nos régions, l'ensemble de ces pratiques entraîne une augmentation des risques à long terme pour la qualité des cours d'eau tant sur le plan chimique qu'écologique.

Afin de contrôler l'évolution de cette qualité, un programme de mesures et de classifications des différentes limites de classes d'état et de potentiel écologique a été publié dans le Code wallon de l'eau (Livre II du Code de l'Environnement). Les éléments essentiels à la quantification de la qualité écologique sont exprimés par la valeur de l'indice ainsi que par un Ratio de Qualité Écologique (RQE) pour chaque masse d'eau. Une masse d'eau sert à la classification des différents milieux aquatiques (lacs, rivières, surface en eau artificielle,...) qui caractérisent le territoire européen. Celle-ci peut-être souterraine ou de surface et considérée comme naturelle, fortement modifiée ou artificielle. Selon la directive Cadre sur l'eau, une masse d'eau de surface est une partie distincte et significative des différents milieux aquatiques (Contrat de rivière Vesdre, s.d.). Pour les masses d'eau naturelles, les facteurs pris en compte sont les diatomées benthiques, les macroinvertébrés benthiques, les poissons et les macrophytes. Pour les masses d'eau artificielles, les facteurs pris en compte sont les diatomées benthiques, les macroinvertébrés benthiques, les poissons et les phytoplanctons. Des paramètres chimiques sont aussi analysés en relation avec la qualité écologique des cours d'eau afin de mieux comprendre ceux-ci (Moniteur belge, 2012).

L'intensification consiste notamment en une diminution du nombre des petites parcelles. Dès 1956, les premières lois sur le remembrement agricole ont fait leur apparition dans la législation belge et d'autres ont suivi, en 1970 et 1976. Le remembrement agricole, maintenant appelé aménagement foncier rural, a longtemps exclusivement consisté en un regroupement des terres d'un agriculteur en parcelles grandes et mécanisables, généralement à proximité de sa ferme. Les cultures de plus grandes dimensions engendrent un passage plus aisé, plus rapide et, finalement plus rentable pour les machines agricoles (semoirs, pulvérisateurs...). La création de grandes parcelles de cultures a entraîné une diminution des murets et des haies entre les parcelles et une augmentation de la

longueur de pente et du risque d'érosion. À l'heure actuelle, le département de l'aménagement foncier rural intègre les paramètres de multifonctionnalité de l'espace rural et notamment l'écologie. Un exemple, déjà réalisé sur le bassin versant de la Mehaigne à Forville, illustre l'amélioration de différents services tels que la production agricole, la lutte contre l'érosion et la préservation des ressources en eau mais également des services de loisirs à la population et du maillage écologique (Brahic et al., 2016).

Depuis plusieurs années, la fréquence des coulées boueuses et des inondations semble avoir augmenté, et provoque pour une partie de la population d'importants dégâts. Ceux-ci peuvent compter en moyenne entre 262 € et 12914 € (Dogot et al., 2014) . Ces phénomènes touchent l'ensemble de la Wallonie et certaines communes sont plus à risque que d'autres. Ainsi diverses cartes existent en Wallonie telles que la carte des zones inondables ou la carte erruissol qui décrit le risque d'érosion concentrée (Géeoportails, s.d.). Ainsi, les abords d'un cours d'eau sont sensibles aux crues de celui-ci, tandis que le milieu rural subit plutôt des inondations par ruissellement et des coulées de boue.

En termes d'érosion et de coulées boueuses, deux périodes de l'année sont plus à risque : il s'agit du printemps (et du début de l'été) et de l'automne. La première période correspond au début de croissance des cultures de printemps, lorsque le taux de recouvrement par la végétation est faible. La seconde correspond à la récolte de ces mêmes cultures, qui laissent le sol temporairement à nu avant la croissance des cultures d'hiver ou cultures de recouvrement (Evrard, 2008a).

La nature du type de sol a également un impact important sur le phénomène de coulées boueuses en modifiant les propriétés de capacité d'infiltration ou d'érodibilité. Ainsi, la nature principalement loessique du bassin versant entraîne un risque de coulées boueuses plus important (Boardman et Poesen, 2006).

L'augmentation des aléas d'inondations se justifie par l'intensité accrue des précipitations (Evrard et al., 2008b) et de l'érosivité qui en résulte durant la période de mai à septembre (Figure 1) (Verstraeten et al., 2006). Ces événements provoquent une brusque remontée du niveau d'un cours d'eau ou apportent de l'eau en quantité trop importante sur les terres pour que celle-ci puisse s'infiltrer avant de ruisseler. Cette eau qui ne peut s'infiltrer peut provoquer en ruisselant des coulées boueuses.

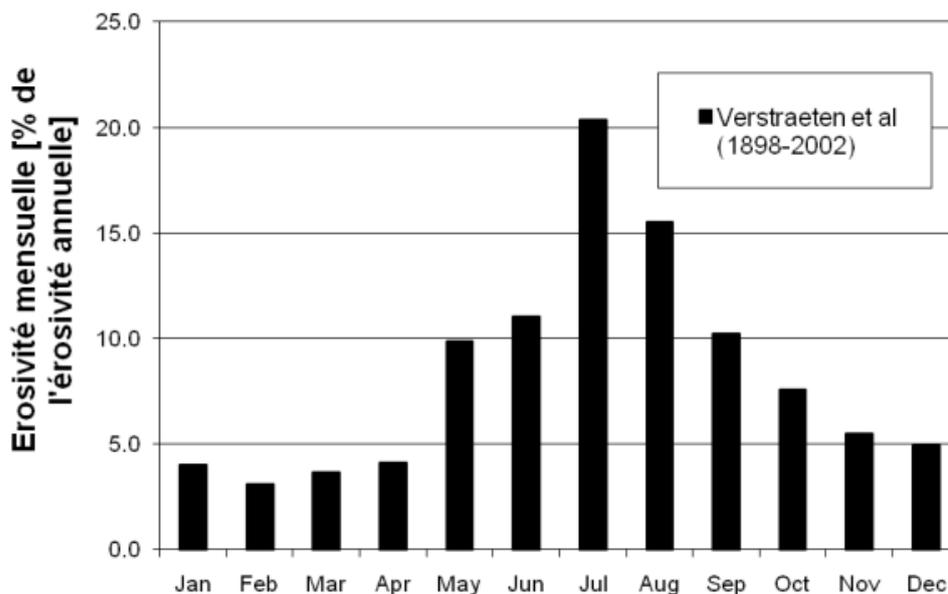


Figure 1 : Évolution mensuel de l'érosivité annuelle (Verstraeten et al., 2006)

L'évolution de l'occupation des sols a également un impact, et particulièrement l'augmentation de zones urbanisées, dont les surfaces sont généralement imperméabilisées. Dans ces zones, l'eau ruisselle et s'accumule en bas de pente si le réseau d'égouttage n'est pas optimal. L'urbanisation provoque, de ce fait, une augmentation de la fréquence de petites inondations mais n'aura que peu d'impact sur les inondations plus conséquentes. L'impact de l'urbanisation sera plus grave pour les précipitations d'été plutôt que d'hiver et un reboisement réduira l'importance de ces précipitations (Hundecha et Bárdossy, 2004). Ce phénomène se produit s'il y a sous-dimensionnement des infrastructures en comparaison au besoin réel ou si des éléments entravent le parcours de l'eau dans l'égouttage (raccords sauvages, accumulations de déchets...) (Bernard S., *inasep*).

En milieu rural, ce sont les coulées boueuses qui sont les plus problématiques. En effet, on peut constater des zones d'accumulation en pied de pente pour de l'érosion diffuse mais également la présence de ravines et de rigoles pour les cas d'érosions concentrées. Au sein du champ, une baisse de la qualité du sol peut mener à une perte de rendement pour le producteur. Cette érosion sera dépendante de la longueur et du pourcentage de pente, du type de culture et de l'intensité des pluies (Boardman et Poesen, 2006).

Globalement, l'érosion des terres va provoquer une diminution de la productivité d'un champ. Cela est dû, d'une part, à la perte de sol et donc d'éléments nutritifs. D'autre part, les ravines peuvent provoquer, lors de leur formation, des dégâts aux cultures. Ceux-ci peuvent être une destruction partielle ou complète d'une plante ou encore la création d'une hétérogénéité dans la croissance des cultures à l'échelle d'une parcelle. Les ravines peuvent également compliquer la pratique des

agriculteurs lors du passage des tracteurs (Boardman et Poessen, 2006 ; Evrard, 2008). Dans certains cas, si elles sont de trop grandes dimensions, il est nécessaire de combler celles-ci avant de reprendre un passage avec un tracteur.

Pour les autorités communales aussi, les coulées boueuses sont problématiques. En effet, celles-ci arrivent généralement sur la voie publique et peuvent provoquer le colmatage des avaloirs et autres entrées d'égouttages. Cela nuit à la sécurité et à la salubrité publique et doit donc être pris en charge par les autorités (Bernard S., 2017). Le déblayement et nettoyage des voiries entraînent des coûts non-négligeables en temps et en argent qui pourraient être réduits via la pose de mesures antiérosives. Le financement de ces mesures est un coût pour les communes, mais qui sera rentabilisé à plus ou moins long terme en fonction de la fréquence des prochains aléas pluvieux. Dans l'étude réalisée par Dogot et al. (2014), le coût entrepris par les communes concernées par des coulées boueuses peut aller de quelques milliers d'euros jusqu'à plus d'un million pour les communes particulièrement touchées. Selon Evrard et al. (2007), le coût des dommages engendrés par les orages peuvent osciller entre 16 et 172 millions d'euros en fonction de l'intensité l'intempérie pour le centre de la Belgique.

Pour les riverains également, les dégâts dus aux inondations et aux coulées de boue sont réels. Les coulées boueuses sont considérées comme des flux d'eau originaires de terres agricoles et qui entraînent avec eux des particules en suspension (Evrard, 2008). Ces dégâts peuvent conduire à de simples nettoyages, mais peuvent aller jusqu'à des réparations dans les jardins, caves, garages ainsi qu'au rez-de-chaussée lors de phénomènes de plus grande importance. Les coûts de rénovation peuvent être engendrés par des travaux à effectuer (réduire l'humidité des murs, renouveler le carrelage...) comme par des biens mobiliers à remplacer (meubles, appareils électroménagers ou motorisés...) (Dogot et al., 2014). Les habitations qui se trouvent dans ces zones perdent potentiellement de la valeur sur le marché immobilier. De plus, ces habitants rencontrent plus de difficultés à faire assurer leurs biens. Il est également judicieux de parler de pertes sentimentales pour les personnes sinistrées : des biens d'une valeur affective aux yeux de leur propriétaire peuvent subir des dégâts. De plus, une crainte peut également être ressentie à chaque phénomène orageux par les habitants de zones déjà touchées par des inondations. Cette inquiétude est parfois telle que certains riverains n'osent plus partir en vacances de peur de devoir rentrer précipitamment et constater les dégradations. Ces dommages intangibles sont peu quantifiés à ce jour (Bernard S., 2017).

Comme décrit précédemment, beaucoup d'espèces protégées sont présentes sur le site et notamment la mulette épaisse (*unio crassus*). Cette espèce est protégée à l'échelle européenne. La

population de cette moule d'eau douce protégée est retrouvée à tous les stades de développement dans la Meuse et ses affluents. Augmenter les chances de reproduction de celle-ci est alors capitale et cela passe par la préservation son milieu. L'érosion des sols entraîne une augmentation de la quantité de sédiments au sein des cours d'eau dont le lit peut se colmater. Ce phénomène entraîne une baisse des conditions de vie à l'état juvénile, stade dans lequel les individus s'enfouissent dans le lit. Le colmatage augmente le risque d'asphyxie des juvéniles qui, à terme peuvent réduire le nombre de spécimens dans ce bassin versant (Vander Linden, 2017). Des recherches ont déjà été effectuées précédemment afin de quantifier le nombre et les lieux de présence de cette espèce au sein de la Meuse et de ses affluents ainsi que de trouver des sources possibles du colmatage du lit de ces cours d'eau (Civino, 2016). Une autre étude s'est intéressée à la lutte contre l'érosion des sols à l'échelle de points sensibles en se concentrant sur un bassin versant de dix-huit hectares (Dardenne, 2007). L'érosion des sols a donc un impact autant sur les espèces animales que sur les habitants des zones concernées ou sur les autorités. Augmenter les connaissances en ce phénomène permettra de réduire l'ensemble des dégâts causés par celui-ci.

a. Concepts-clés de l'érosion

L'érosion d'un sol se caractérise par deux stades distincts : le détachement de particules individuelles et leurs transports par des agents érosifs tels que l'eau, le vent ou la glace mais aussi la gravité, la topographie, les variations de température et la récolte de cultures (Morgan, 2005 ; Boardman et Poesen, 2006 ; Verheijen et al., 2009). Lorsque l'énergie nécessaire au transport de la particule n'est plus atteinte, les particules se déposent au sol.

À l'échelle macroscopique, le sol est fragilisé par les conditions météorologiques qui ont des effets mécaniques (succession de phases de gel/dégel ainsi que sec/saturé...) mais aussi par les pratiques agricoles ou encore les piétinements du bétail et des hommes (Morgan, 2005). Les pertes en éléments de sol peuvent également résider dans les processus biologiques et pédologiques (altération de la part minéralogique du sol ou décomposition de la matière organique du sol) (Verheijen et al., 2009).

b. Types d'érosion :

Le ruissellement de l'eau est l'élément de transport des particules et est défini comme le mouvement de l'eau dû à la force de gravité suite à un événement pluvieux. Celui-ci peut être en nappe (diffus) ou en rigole (direct).

- Érosion en nappe

L'érosion en nappe ou érosion diffuse correspond à une perte homogène de sol, sous la forme d'une couche uniforme, qui résulte de l'entraînement de particules via du ruissellement en nappe (Boardman et Poesen, 2006). Dans ce type d'érosion, une lame d'eau irrégulière, mais de faible profondeur s'écoule diffusément sur la surface (Fox, 2008).

- Érosion en rigole

L'érosion en rigole se réalise via l'apparition, lors d'événements pluvieux, de nombreux petits chenaux de quelques centimètres de profondeur dus aux ruissellements concentrés (Boardman et Poesen, 2006). Lorsque les canaux s'agrandissent jusqu'à avoir une section de plus d'un pied² (i. e. 929 cm²), ceux-ci portent le nom de ravine.

Des recherches ont été effectuées afin de classer différents types de culture en fonction de leur impact sur le ruissellement en nappe et en rigole. Les conditions les plus problématiques sont les sols nus, les vignobles et champs de maïs, suivi des cultures de printemps, céréales, brûlis, fourrages, arbustes, prairies et forêts (Boardman et Poesen, 2006).

- Érosion aratoire

Il existe également de l'érosion aratoire qui se définit comme le déplacement de particules dû au travail du sol. Ce déplacement dépend de la gravité et est influencé par la direction du travail du sol. La complexité de la topographie sera un des éléments qui favorise cette érosion, les zones les plus sensibles sont les zones abruptes et convexes (Figure 2) (Lindstrom, 2002 ; Wang et al. 2016). Dans les régions avec un sol tel celui de la ceinture loessique, le labour comme la récolte de racines et de tubercules, est un facteur non négligeable du phénomène d'érosion et de la quantité de terre libérée. Selon une étude de Cerdan et al. (2010), les pratiques culturales sont la cause majeure de l'érosion sur le sol européen. L'érosion aratoire est un phénomène plus progressif que l'érosion hydrique. Elle peut également modifier les propriétés du sol, l'interaction entre l'eau, le sol et les plantes, la productivité et la qualité des sols ainsi que d'autres procédés dynamiques à l'échelle du paysage agricole. L'interaction entre ces types d'érosion est, à l'heure actuelle, le sujet de plusieurs recherches, notamment car la redistribution des particules de sol suite aux pratiques agricoles modifie les propriétés hydrodynamiques à l'échelle du paysage (Wang et al., 2016).

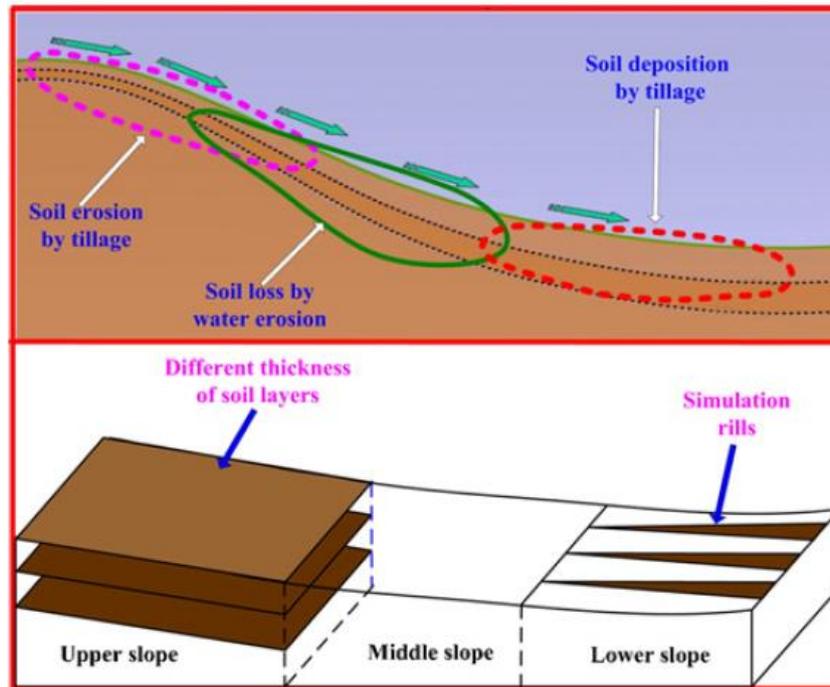


Figure 2 : Déplacement des particules de sol en fonction de la pente

- Autres types d'érosion

- L'érosion souterraine se produit lorsque le ruissellement a lieu au sein du sol, que ce soit de manière diffuse ou concentrée dans le cas de sol contenant des systèmes de drainage. Le pouvoir érodant de ce ruissellement est encore peu connu pour les déplacements entre les pores, à l'inverse de cas de ruissellements concentrés où l'érosion peut être très forte au niveau des parois de la canalisation (Morgan, 2005).

- L'érosion éolienne est un phénomène qui se produit dans des zones plutôt arides, où le sol est sec et poussiéreux, où peu d'éléments freinent l'embarquement par le vent. Les conditions pédologiques et météorologiques qui se produisent dans nos régions ne provoquent pas d'érosion éolienne, elles ne rentrent donc pas en compte dans la suite de ce rapport (statistique développement durable français, s.d.).

- L'érosion par la glace est due à l'arrachage de particules par le mouvement de la glace qui avance au-dessus du sol. Ce type d'érosion se produit notamment en montagne et provoque l'apparition de moraine.

c. Facteurs influençant l'érosion :

Un sol est plus ou moins sensible à l'érosion en fonction de deux phénomènes opposés et des proportions de ceux-ci : la force motrice de l'érosion (i. e. précipitations et érosivité du ruissellement induit) et la résistance du sol (i. e. l'érodibilité du sol).

- Érosivité des sols

L'érosivité des sols est définie comme la sensibilité du sol au détachement des particules lors de l'impact d'une goutte d'eau et l'action de cisaillement du ruissellement. Elle résulte de l'infiltrabilité et de la résistance du sol. Sur des sols loessiques, cette érodibilité varie fortement en fonction de la période de l'année. Cela est dû à la variabilité de la couverture (type de végétation, stade de développement...) de la teneur en eau du sol et de la diminution du taux d'infiltration de l'eau dans les sols cultivés après le labour ou le semis (encroûtements d'une partie du sol) (Evrard et al., 2010). D'autres facteurs influencent également l'érodibilité tels que la stabilité des agrégats, la texture du sol, la résistance au cisaillement et la teneur en éléments chimiques et organiques (Morgan, 2005). Du fait de la texture, c'est le limon qui résiste le moins au détachement des particules. En effet, comparé aux sables, il est plus léger et donc nécessite moins d'énergie pour être transporté. Comparé aux argiles, il est de taille plus importante et cela entraîne des forces de cohésion entre particules plus faibles.

- Précipitations

Les précipitations provoquent le détachement des particules de sol autrement appelé l'effet splash. Une précipitation de plus forte intensité engendre un détachement des particules plus conséquent que lors de pluies de faibles intensités. Cependant, le taux de détachement de ces particules diminue d'autant plus rapidement que l'intensité de la pluie sera forte et le sol perd moins facilement des particules lorsque sa surface est mouillée (Mermut et al., 1996). Les particules libérées peuvent provoquer une croûte de battance soit là où elles ont été libérées (croûte structurale), soit en aval de leur position d'origine (croûte de dépôts). La répartition spatiale des sédiments et ainsi de ces types de croûtes dépendent notamment de la rugosité du sol en présence. La formation de cette croûte de battance entraîne avec elle des problèmes d'infiltrabilité de l'eau, et de retenue de l'eau au sein du sol. Cela complique également la levée des semis. Le colmatage ainsi décrit de la surface engendre la formation de micro ruissellement et donc de l'érosion (Valentin et Bresson, 1992). La formation de la croûte de battance est influencée par de nombreux facteurs tels que le contenu en argile, la minéralogie, la quantité et la nature en cations échangeables, la teneur en matière organique, le type et la concentration en électrolytes du sol et de l'eau de pluie, l'intensité de précipitation, la teneur en

eau déjà présente dans le sol, la pente de la surface, les techniques culturales utilisées à l'endroit concerné (Mermut et al., 1996).

- Autres facteurs

Le taux d'érosion est également influencé par des phénomènes plus locaux. La présence de fragments rocheux au sein du sol a pour effet de réduire ce taux. En effet, leur présence influence le parcours du ruissellement et retient les particules retirées du sol par effet splash. La longueur de pente ainsi que la répartition des cultures peuvent être problématiques. Dans certaines régions, la densité de la végétation pérenne, combinée aux variations d'infiltrabilité du sol, provoque des coupures dans le ruissellement. Dès lors, il n'y a plus de croissance nette du ruissellement avec la longueur de pente. C'est le cas dans certaines zones du pourtour méditerranéen (Cerdan et al., 2010).

3. Matériels et méthodes

a. Description du bassin versant

Dans le cadre de ce mémoire, le bassin versant (BV) de la Meuse sera plus particulièrement étudié. Celui-ci est compris dans le sous-bassin hydrographique Meuse Aval et fait partie du bassin versant de la Meuse.

La Meuse est un cours d'eau d'une longueur de 65 km. Elle prend sa source à Saint-Denis (La Bruyère), parcourt la Hesbaye et se jette dans la Meuse à Statte (Huy). Ses principaux affluents sont la Soëlhe, la Burdinale et la Fosseroule (Figure 3). L'ensemble du bassin versant s'étend sur plus de 369 km², entièrement en région wallonne et est desservi par 400 km de cours d'eau. Le BV se situe dans les Provinces de Namur et de Liège et comporte entièrement ou partiellement douze Communes (Figure 4). Il s'agit des communes de Braives, Burdinne, Éghezée, Fernelmont, Gembloux, Hannut, Héron, Huy, La Bruyère, Villers-le-Bouillet, Wanze ainsi que Wasseiges (Comité Local Meuse, s.d.).

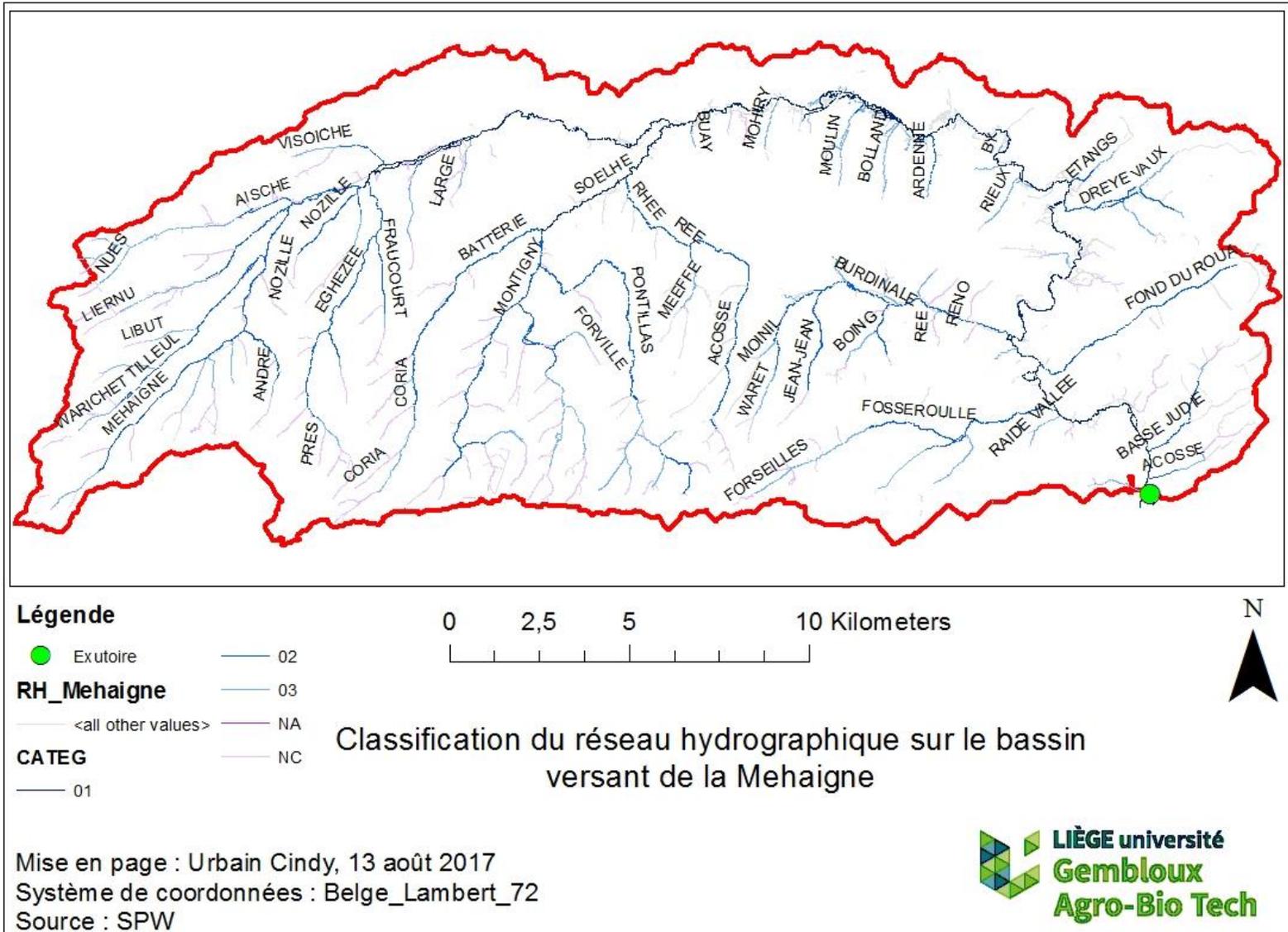


Figure 3 : Classification du réseau hydrographique sur le bassin versant de la Mehaigne

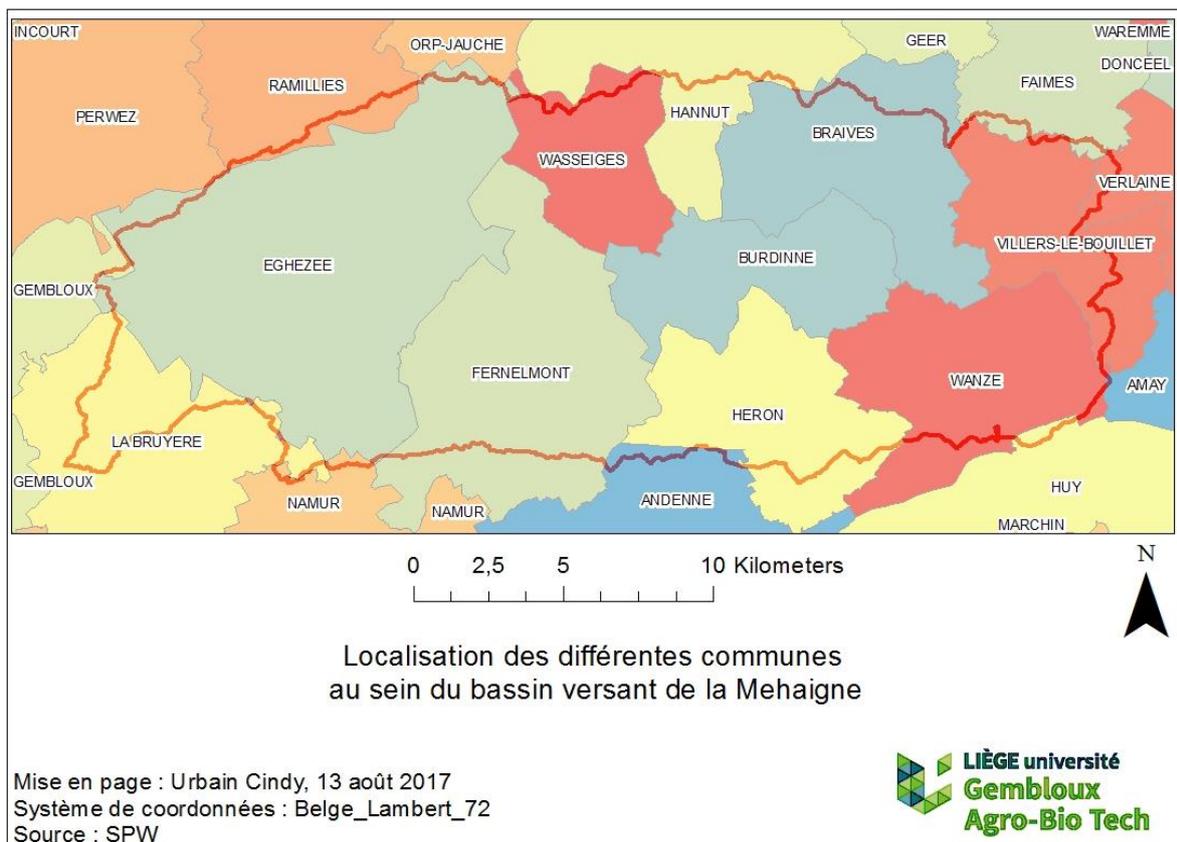


Figure 4 : Localisation des différentes communes au sein du bassin versant de la Meuse

La répartition des pentes au sein du BV (Figure 5) ne suit pas l'évolution classique, les pentes les plus fortes sont situées à proximité de l'exutoire et les pentes les plus faibles se trouvent en amont. Cela peut être expliqué par le captage de la Meuse par la Meuse, qui était auparavant un affluent de l'Escaut (Vander Linden, 2017). Ce relief peut être observé sur la Figure 6, où l'on constate que les zones les plus accidentées suivent le parcours de la Meuse à proximité de l'exutoire. Comme visible sur la Figure 5, la plus grande partie du bassin versant se trouve sur des pentes relativement faibles (<10 %), dont la valeur médiane est de 2,76 % et est principalement en amont du bassin versant.

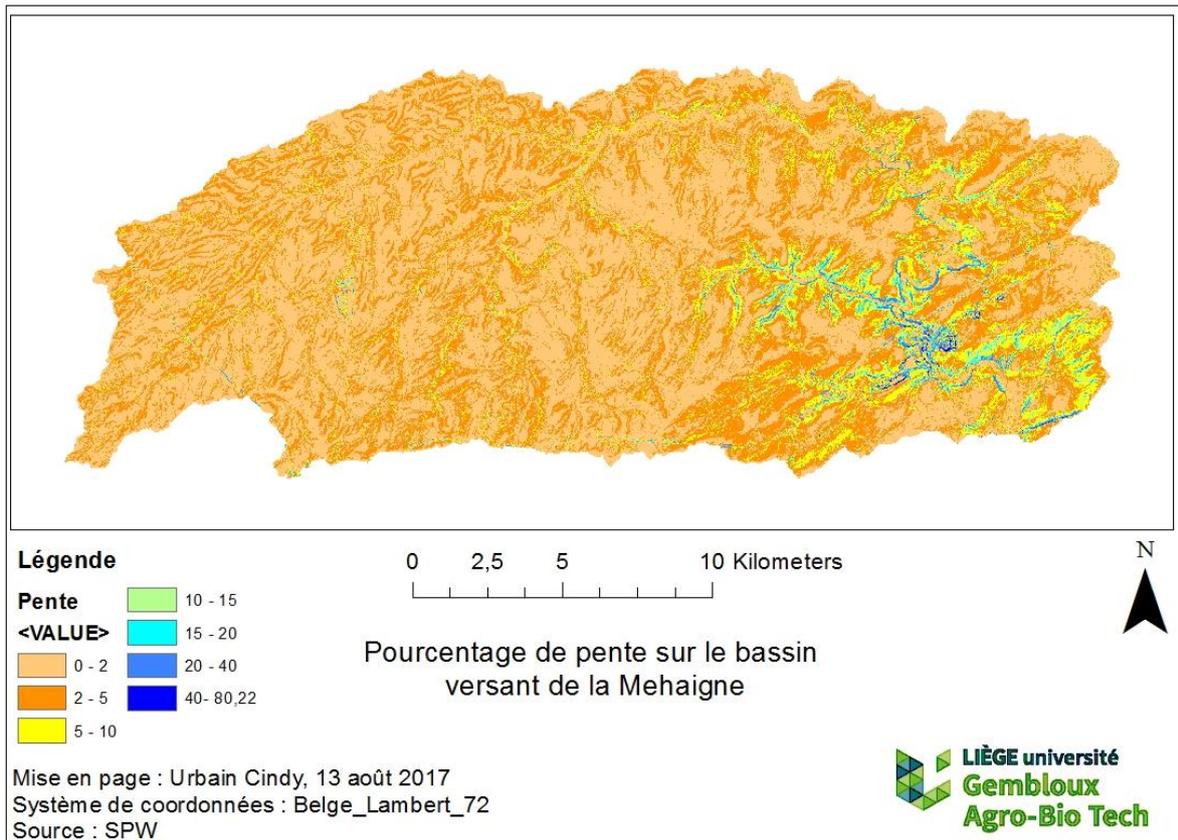


Figure 5 : Pourcentage de pente sur le bassin versant de la Meuse

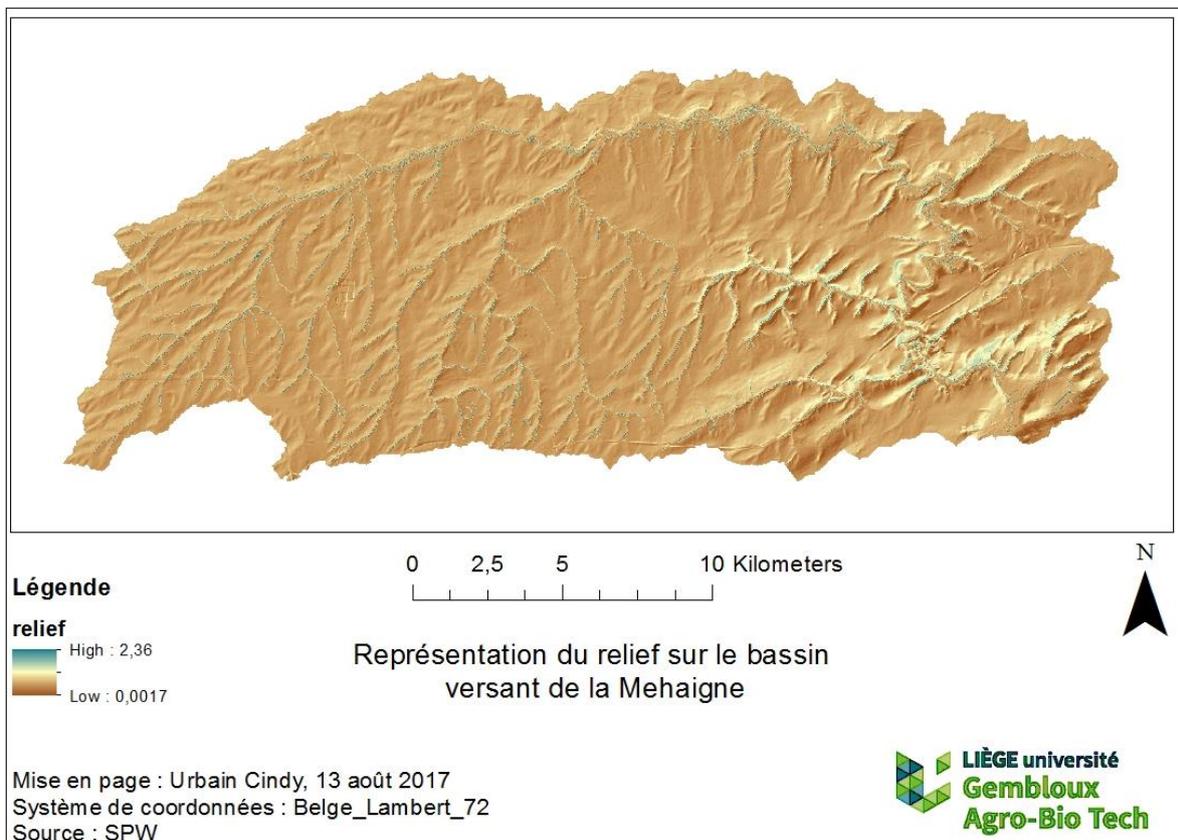
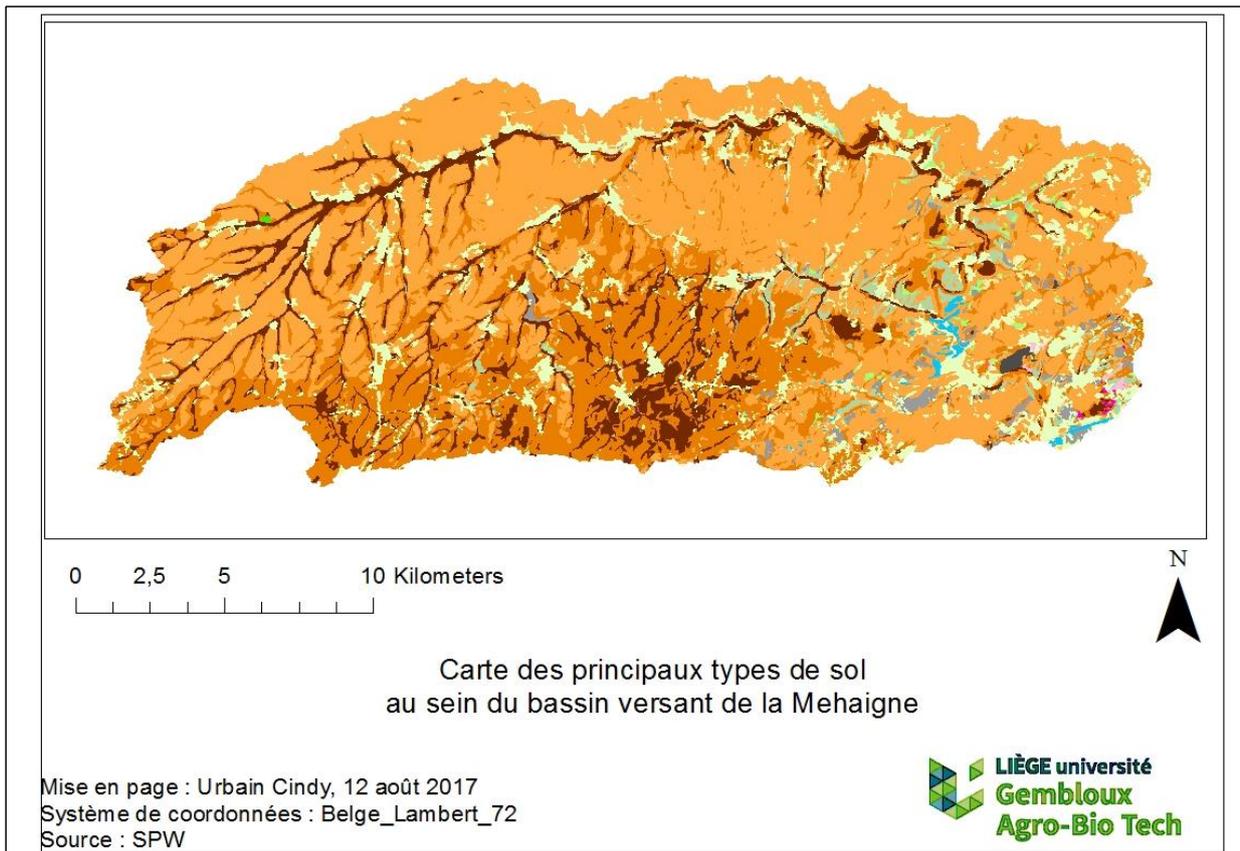


Figure 6 : représentation du relief sur le bassin versant de la Meuse

La carte des principaux types de sol du bassin versant est basée sur la Carte Numérique des sols Wallons qui a été produite dans le cadre du projet de cartographie des sols wallons (Legrain et al., 2011). Au sein du bassin étudié, ce sont principalement des sols limoneux à drainage favorable ainsi qu'à drainage modéré qui sont présents. Ces sols se trouvent au niveau des versants sur les trois quarts amont du bassin versant. À proximité des cours d'eau, les sols sont limoneux à drainage assez pauvre à très pauvre. Dans la partie est, le sol est partiellement limono-caillouteux à charge schisteuse, calcaire ou silexite. Quelques zones présentent également des sols argileux ou sableux mais sont largement minoritaires sur ce bassin versant (Figure 7).

Le climat présent au sein du BV est qualifié de climat tempéré à hiver accentué. Les températures moyennes sont de 3° en hiver et de 18° en été pour des précipitations moyennes mensuelles comprises entre 50 et 70 mm. Le vent souffle principalement du sud-ouest, mais des pointes de vent peuvent également souffler du nord-est. Les communes de ce bassin versant comptent en moyenne 5 à 6 heures d'ensoleillement en hiver et 12 à 13 heures en été (Institut Royale Météorologique, s.d.).



Légende

- Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif
- Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
- Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement favorable
- Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
- Sols limoneux à drainage naturel favorable
- Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait
- Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
- Sols argileux à drainage naturel favorable à imparfait
- Sols argileux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
- Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable
- Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel favorable
- Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel modéré à assez pauvre
- Sols limono-caillouteux à charge schisteuse et à drainage naturel principalement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge psammitique ou schisto-psammitique et à drainage naturel principalement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge calcaire ou contenant du calcaire et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable
- Sols limono-caillouteux à charge crayeuse et à drainage naturel favorable
- Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux
- Sols artificiels ou non cartographiés

Figure 7 : Carte des sols simplifiés au sein du bassin versant de la Meuse

Le bassin versant compte cinq masses d'eau au sens de la directive cadre sur l'eau (MV03r, MV04r, MV05r, MV06r, MV31r) (Figure 8). Comme expliqué dans l'introduction, les masses d'eau servent d'unité de quantification de la qualité écologique et chimique avec des critères allant de très bon à très mauvais. L'état écologique se caractérise par des critères biologiques, physico-chimiques ainsi que hydromorphologiques. L'état chimique est, quant à lui, caractérisé par la présence et la concentration d'une série d'éléments chimiques. Ce critère est qualifié de « avec et sans PTB » (substances persistantes, bio-accumulatives, toxiques, ubiquistes) qui ne sont techniquement pas extractibles avec les technologies actuelles. Cette évaluation est réalisée tous les six ans. Le prochain bilan aura lieu à la fin du plan de gestion actuel (2021) mais pour certaines masses d'eau, l'état dit de « bon état » est déjà reporté à 2028 (à la fin du plan de gestion suivant). Des dérogations économiques, écologiques ou techniques peuvent être attribuées pour certains critères, si les mesures à prendre ne sont raisonnablement pas possibles. Pour le bassin versant de la Meuse, l'état des masses d'eau est globalement mauvais. Du point de vue écologique, la qualité des paramètres varie de moyen à mauvais, principalement en raison de critères biologiques (peu d'espèces exigeantes) et physico-chimiques (DCO, DBO5, phosphates, nitrites, nitrates, matière en suspension...). L'état chimique est globalement bon. Seule la masse d'eau Mv06r a un état chimique dit « pas bon » dû à la présence d'isoproturon (herbicide) et de mercure. Ce critère est défini sans les PTB ubiquistes qui sont problématiques pour chacune des cinq masses d'eau. L'ensemble de ses critères déclassant stoppent le travail d'analyse. Les mesures de teneur en particules dans les eaux ne sont effectuées bien que cette problématique a déjà fait l'objet de travaux dans ces masses d'eaux (Civino, 2016). L'amélioration de ces états passe principalement par une meilleure connaissance de la relation entre la qualité de l'eau et les zones polluées, une meilleure gestion des eaux usées, ainsi que par une connaissance des pollutions historiques (spw, 2016).

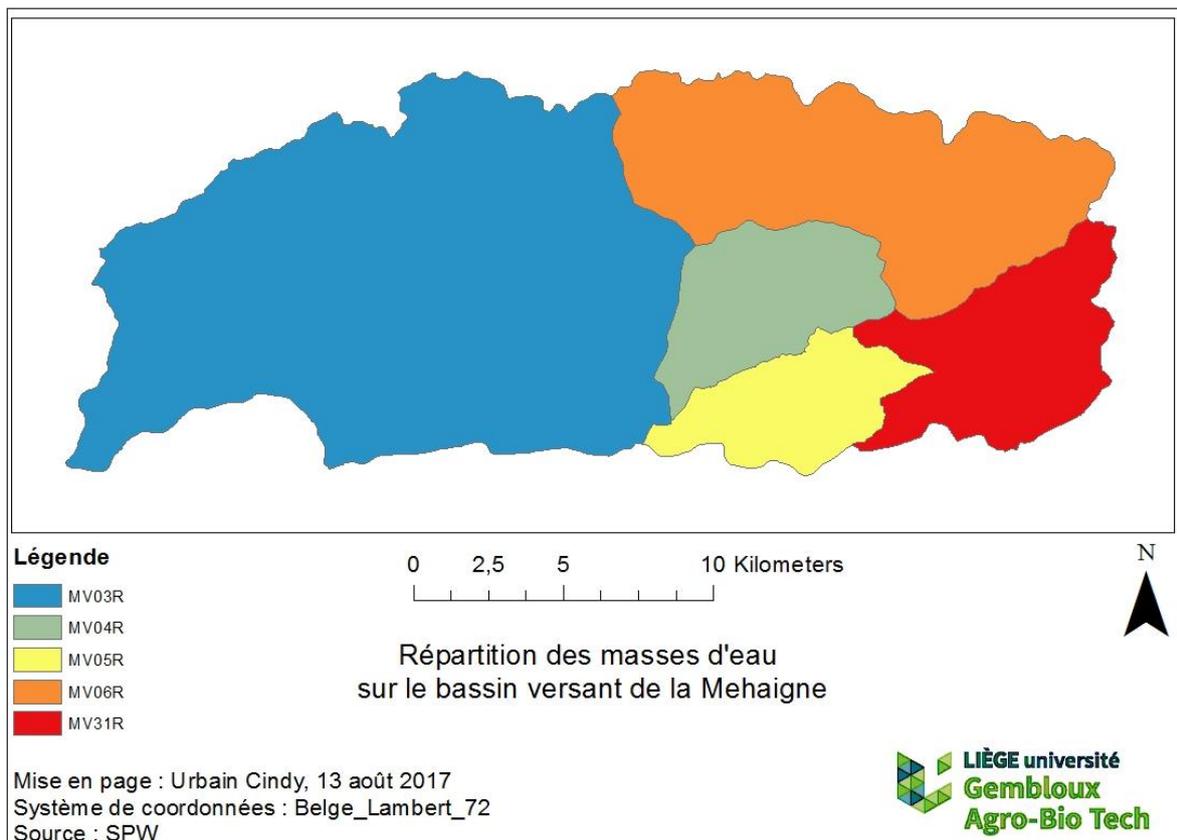


Figure 8 : Répartition des masses d'eau sur le bassin versant de la Meuse

La plus grande superficie du bassin versant (79.12%) est consacrée à l'agriculture. Le reste se compose de forêts et milieux semi-naturels (5,9 %), de territoires artificialisés (14,34 %) et des surfaces en eau et milieux humides (0,64 %). Cette représentation majoritaire des zones cultivées s'interprète sur base des résultats de déclassement physico-chimique présenté précédemment pour chacune des masses d'eau (SPW, 2016).

L'essentiel des cultures se compose de céréales d'hiver (43 %), de betteraves et chicorées (15 %) et de prairies permanentes (14 %). La répartition complète des types de cultures est présentée à la Figure 9 (SPW, 2016).

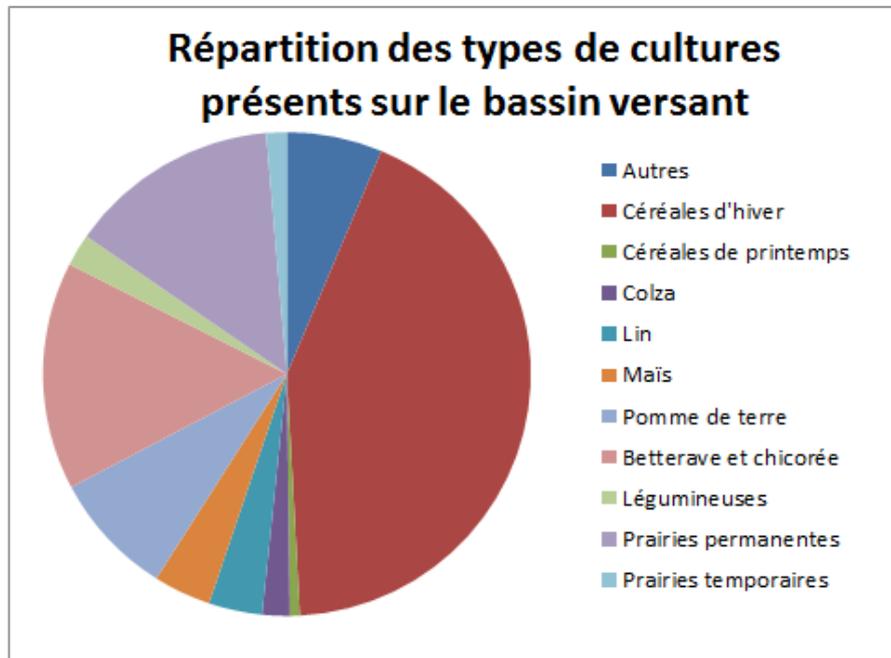


Figure 9 : Répartition des différents types de cultures principales présentes sur le bassin versant en 2015(SPW, 2016)

Trois zones Natura 2000 sont également présentes sur le bassin versant (Figure 10 : Zones natura 2000 et positions des frayères sur le bassin versant de la Meuse) et représentent au total, 0,524 km² soit 1,43 % de la surface totale de celui-ci. Il s'agit des étangs de Boneffe (6,06 ha), de la vallée de la Meuse (226,59 ha) ainsi que de la vallée de la Burdinale (291,79 ha) (Wallonie.be, s.d.). Le bassin versant compte également deux sites protégés et trente-trois sites de grands intérêts biologiques. La diversité de ces sites (marais, sablières, fonds de ruisseau, prairies humides, talus, bois, vallées et vallons) donne la possibilité de surveiller l'évolution de nombreuses espèces (amphibiens, poissons, oiseaux, insectes, plantes supérieures, mollusques...) (Wallonie.be, s.d.).

Au sein de ce bassin versant, quatre frayères (Figure 10) ont été réhabilitées en 2015. Celles-ci sont situées à Ambresin, Moxhe, Avennes et Latinne. Leur réhabilitation a été possible grâce à une subvention du « Fonds européen pour la pêche » (FEP). Les objectifs de la réhabilitation consistaient à revaloriser de façon durable les frayères existantes et dès lors, favoriser la reproduction naturelle des espèces phytophiles. Ces frayères présentent déjà des indices d'envasement comme mesurés par Civino (2016). Dans son rapport, le lit de la Meuse et de ses affluents sont considérés comme sédimenteux jusqu'à Fumal.

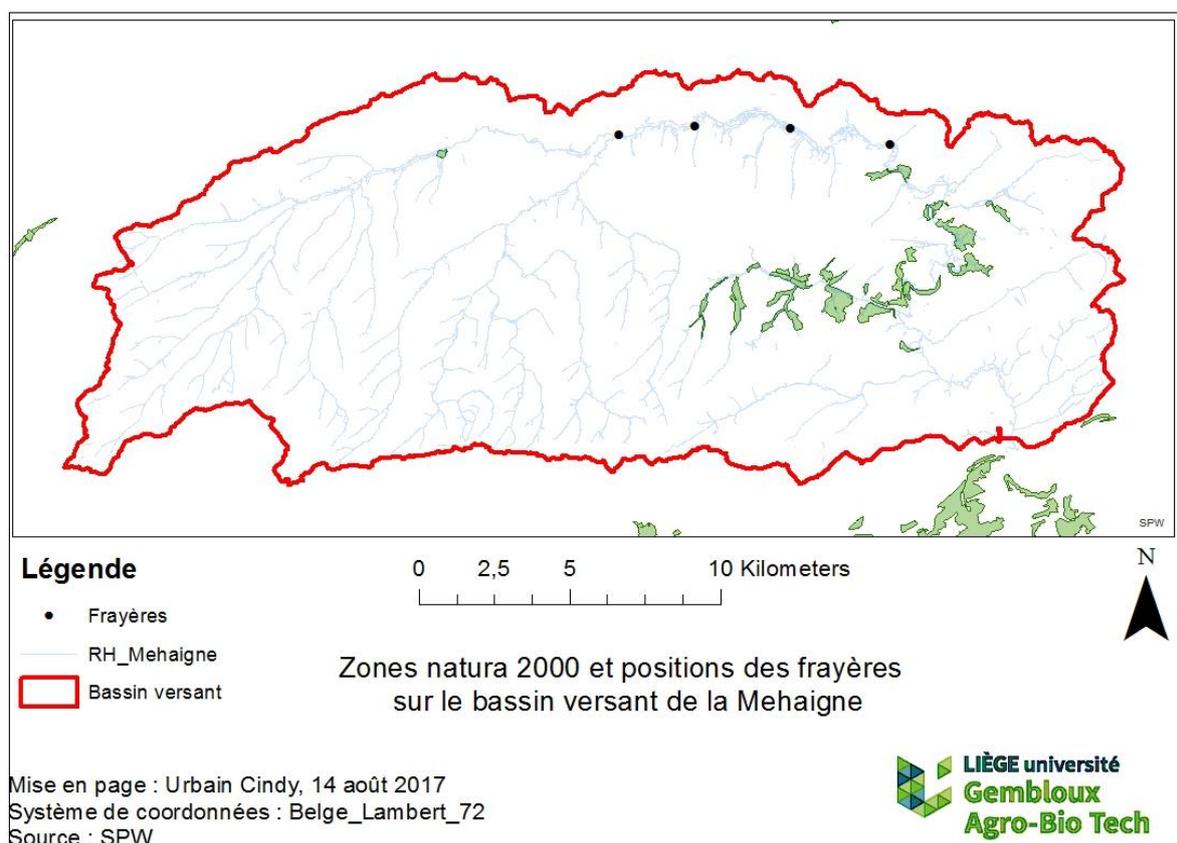


Figure 10 : Zones natura 2000 et positions des frayères sur le bassin versant de la Meuse

b. Patrimoine et organisation du bassin versant

Divers acteurs sont actifs dans les domaines de l'environnement, de la lutte contre l'érosion et des inondations. Tous les groupes ne possèdent pas les mêmes niveaux de pouvoirs ni les mêmes rapports avec les différents acteurs de terrain. À l'échelle de la Wallonie, on peut évoquer les communes, les services provinciaux, les différents parcs naturels et contrats de rivière, la cellule GISER ainsi que les auteurs de projets de paysage et, finalement, les groupes d'actions locales et l'ASBL Greenotec (Réseau wallon de développement rural, 2011).

L'ASBL Greenotec (acronymes de groupement de recherches sur l'environnement et l'étude des nouvelles techniques culturales) a été fondée grâce à la volonté des agriculteurs d'accroître leurs connaissances sur les techniques de conservation des sols. Ils réalisent diverses recherches pluriannuelles sur de grandes cultures et se basent sur leurs résultats pour conseiller les agriculteurs. Ils réalisent également des actions de vulgarisation auprès de la population.

Les Wateringues qui sont des administrations publiques gérées par ses adhérents, financièrement sous le contrôle de la province et dépendantes des moyens techniques de la région. Leurs missions consistent en une gestion des eaux de surface de leur circonscription avec l'objectif de préserver l'hygiène et l'agriculture. Ils réalisent également des travaux tels que des curages et le placement de mesures antiérosives. Il y en a 23 en Wallonie mais aucune sur le territoire du bassin versant étudié (Wateringues.be, s.d.). Dès lors, la Wateringue de Saint-Trond peut être mandatée pour certains besoins du bassin versant.

Il est important également de parler du Parc Naturel Burdinale-Mehaigne se situe sur 4 communes du bassin versant de la Mehaigne (Braives, Burdinne, Héron et Wanze). Diverses missions sont réalisées par ce groupe : préservation de la faune sauvage, animation locale auprès des écoles et des particuliers. Ce groupe compte également des agents dont la mission est de conseiller les agriculteurs sur les moyens de lutte contre l'érosion des terres et notamment des Mesures Agro-Environnementales (Pays-Burdinale-Mehaigne, s.d.). Un groupe d'action locale existe également (GAL Burdinale Mehaigne) qui réalise un cadastre territorial, des contrats de gestion entre partenaires, charte du territoire mais également une valorisation de plantation comme le bois de saule présent sur le territoire. L'ensemble de ces éléments préserve le patrimoine historique et culturel tels que les vingt moulins présents le long de la Mehaigne.

c. Procédure de l'inventaire terrain

L'inventaire de terrain est réalisé sur la base de contact pris auprès des responsables communaux en relation avec le Comité Local Mehaigne. Des informations sur les coulées boueuses répertoriées par les communes (dates et coordonnées) ainsi que sur les éventuelles mesures antiérosives déjà mises en place par celles-ci sont ainsi collectées. La cellule GISER de la région wallonne est aussi contactée afin d'avoir les rapports rendus sur demande de ces mêmes communes. Ces informations seront condensées et cartographiées et pourront servir de comparaison avec les valeurs modélisées.

d. Modèles utilisés

- ***Perte en sol – WATERSED***

Le modèle WATERSED a été développé par une équipe du bureau de recherches géologiques et minières d'Orléans (BRGM) et a été testé et calibré grâce à des mesures effectuées sur quatre bassins versants situés en Normandie. Il s'agit d'un outil distribué non dynamique, conçu pour modéliser la distribution spatiale du ruissellement et de l'érosion des sols, pour une pluie donnée, en tout point d'un bassin versant (Landemaine, 2016). Ce modèle est une évolution du modèle STREAM, dans lequel chaque pixel représente un réservoir avec des propriétés propres et qui simule les procédés

hydrologiques. Le modèle WATERSED passe d'une approche de parcelles agricoles à celle d'un bassin versant. Les deux modèles gardent en commun une approche « expert system », c'est-à-dire qu'ils classent et regroupent les paramètres fondamentaux de l'érosion et du ruissellement, déterminés par de précédentes expérimentations (Cerdan et al., 2002 ; Landemaine et al., 2016). Dans la pratique, ce modèle se fonde sur un module hydrologique ainsi qu'un module sédimentaire. Le module sédimentaire se sert de la balance hydrologique, de la vitesse et du temps de transport du flux, ainsi que de la durée du ruissellement et de l'itinéraire du flux. Le module sédimentaire quantifie, quant à lui, l'érosion diffuse et concentrée ainsi que le rendement en sédiments et les dépôts. La description des équations utilisées se trouve en annexe a et la liste des fichiers de sortie se trouve en annexe b (Landemaine, 2016).

Le modèle WATERSED nécessite plusieurs données d'entrée. Tout d'abord, un modèle numérique de terrain afin d'isoler la pente et les flux de ruissellement. Il est essentiel de faire coïncider les cellules correspondant au fond de vallée avec le réseau hydrographique. Cette manipulation se réalise avec l'outil « FILL Dem », qui s'installe sur SAGA Gis de la même manière que le modèle WATERSED. Le modèle hydrographique devra également fournir la largeur de chaque portion de cours d'eau sur le bassin versant modélisé. Ensuite, une carte d'occupation du sol, ainsi qu'une carte de texture de sol, sont nécessaires à l'attribution d'un code dit d'« unité pédologique » (UP) qui associe à chaque pixel diverses propriétés sur la base de table d'attribution. À chaque parcelle est assigné un code en fonction de sa catégorie d'occupation (Tableau 1). De la même manière, un autre code a été attribué selon la nature pédologique des différentes plages de sol du bassin versant (Tableau 2). L'annexe c présente les différents types de sols pour chacune des classes du Tableau 2 (Landemaine, 2016).

Tableau 1: code d'occupation des sols (Landemaine, 2016)

1	Culture d'hiver	7	Sol nu
2	Culture de printemps précoce	8	Forêt
3	Culture de printemps tardive	9	Surface en eau
4	Prairie	10	Route
5	Culture permanente	11	Chemin
6	Bâti	12	Espace Vert

Tableau 2 : Code de classification en fonction de la nature pédologique

1	Sols limoneux à drainage favorable
2	Sols limoneux à drainage faible
3	Sols limono-caillouteux
4	Sols argileux
5	Sols sableux

Le code d'unité pédologique (CODE_UP) est alors déterminé selon la relation suivante :

$$\text{CODE_UP} = 10 * \text{code d'occupation du sol} + \text{code de nature du sol}$$

L'annexe d montre la répartition spatiale du CODE_UP sur l'ensemble de bassin versant. Les tables d'attribution utilisent ce code d'unité pédologique afin d'assigner à chaque caractéristique de sol une valeur de capacité d'infiltration, un coefficient de rugosité de Manning, un coefficient d'érodibilité des sols ainsi qu'une concentration potentielle en matière en suspension. Finalement, des événements pluvieux sont tirés des mesures continues de précipitations (Landemaine, 2016).

- ***Connectivité hydrologique - Tool box de Cavalli***

La modélisation de la connectivité hydrologique utilisée dans le cadre de ce mémoire se fonde sur les travaux de Borselli et al. (2008) et adaptés par Cavalli et al. en 2012.

Cette méthode aboutit, pour chacun des pixels, à un indice de connectivité qui représente un proxy du temps de transfert des particules à l'exutoire. Cette valeur relative donne une indication quant à la rapidité d'apport en sédiments vers l'exutoire du bassin versant modélisé (Borselli et al., 2008).

La modélisation se base sur le « Soil Delivery Ratio » (SDR), et décrit la relation existant entre le rendement en sédiment et l'érosion au sein du bassin versant. Les caractéristiques utilisées par les modèles utilisant cette approche sont la topographie, les propriétés géométriques ainsi que le chemin de drainage. À cela s'ajoutent également l'évaluation de la capacité de transport à long terme et les propriétés des sédiments. Les valeurs pour chacun des pixels peuvent être déterminées selon deux approches, l'une dites « amont » et l'autre « aval ». La Figure 11 représente les différents facteurs utilisés pour chacune des deux approches. Pour la part « amont », l'aire de la zone drainée, le gradient de pente de cette zone ainsi qu'un facteur de pondération moyen (correspondant à la contribution de la zone drainée) seront considérés. Pour la part « aval », la longueur du parcours à effectuer pour une particule entre le pixel modélisé et l'exutoire, le gradient de pente le long de ce parcours ainsi qu'un facteur de pondération seront traités (Borselli et al., 2008).

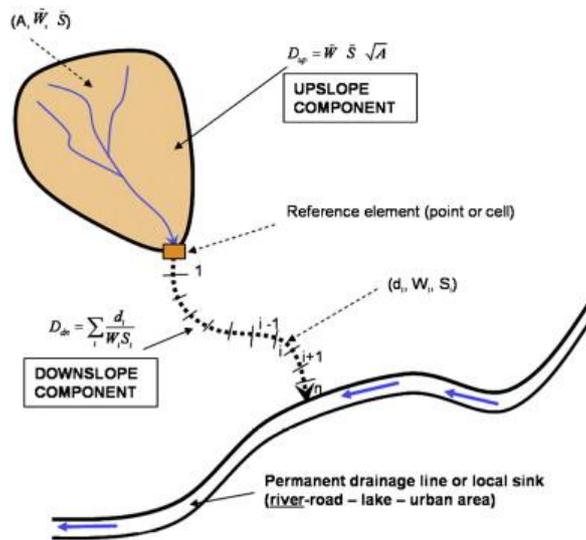


Figure 11 : Représentation des différentes données prises en compte pour la connectivité hydrologique

Le facteur de pondération utilisé dans ce modèle mesure les caractéristiques de surface qui influence la vitesse et le transport des sédiments. Ils représentent ainsi les obstacles aux déplacements des particules dus aux types de végétation et à l'occupation du sol. Borselli et al. (2008) préconisaient d'utiliser comme pondération le facteur cultural utilisé dans le modèle USLE-RUSLE. Cavalli et al. (2012) optent pour une pondération par la rugosité, celle-ci est calculée sur base d'un MNT précis du bassin versant. Ce changement de pondération a été établi par rapport aux conditions de terrain du bassin étudié, ici sur un bassin versant de montagne qui ne comporte pas culture à proprement parlé. Elle représente l'écart-type de la topographie résiduelle à l'échelle de quelques mètres. Cette topographie est, elle, définie comme la différence entre le MNT de base et le MNT moyen lissé (Cavalli et al., 2012).

Dans le cadre de ce mémoire, le logiciel Arcgis 10.3 est utilisé et complété par la toolbox « connectivity index (Cavalli et al. 2013) » Cette tool box détermine un indice de rugosité ainsi que d'un indice de connectivité. L'indice de connectivité se détermine simplement grâce à un facteur de pondération ainsi qu'au MNT lissé, dans lequel les éventuels « puits » ont été retirés via l'outil « pit remove ». Cette opération vérifie qu'aucune discontinuité dans le modèle numérique de terrain n'a persisté au lissage précédemment effectué. Les résultats présentés ci-après sont basés sur une pondération par la rugosité effectuée par suivant l'Équation 1 :

Équation 1 : Équation de pondération par la rugosité

$$W = 1 - \left(\frac{R_I}{R_{I_{max}}} \right)$$

Dans laquelle R_I est l'indice de rugosité et $R_{I_{max}}$ l'indice de rugosité maximal sur l'ensemble du bassin versant.

Une autre pondération peut être effectuée afin de prendre en compte les parcelles agricoles. Pour cela, la pondération prise en compte sera le facteur cultural. Ce paramètre est fonction de l'érosivité de la pluie ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) ainsi que du Soil Loss Ratio, SLR (adimensionnel). La description de l'érosivité annuelle a été réalisée par Verstraeten et al. (2006). Le Soil Loss Ratio correspond aux rapports des pertes en terre, pour une période considérée, c'est-à-dire qu'il exprime la réduction de la perte en sol en comparaison à un sol nu travaillé dans le sens de la pente et avec une rugosité de 0.24 pouce. Ce paramètre est compris entre zéro et un et dépend de cinq facteurs : l'occupation du sol précédent, la couverture de canopée, la couverture par les débris végétaux, la rugosité du sol et l'humidité de sol. Le SLR sera essentiellement influencé par la rugosité de surface, la couverture végétale ainsi que de la hauteur de la végétation. Tous ces paramètres sont définis expérimentalement (Colard et al., 2011).

Afin de tester l'impact de la taille des parcelles sur la connectivité hydrologique du bassin versant, une nouvelle occupation de sol a été créée. Un parcellaire en damier de différentes tailles (10, 50, 100, 200, 400 m) a été apposé sur le modèle numérique de terrain d'un sous bassin versant. Pour accentuer le contraste entre les parcelles, deux types de cultures ont été sélectionnées sur base de leur facteur cultural. Il s'agit des prairies permanentes (0.003) d'une part et des cultures de maïs (0.505) d'autre part.

e. Données d'entrées des modèles

- *Modèle numérique de terrain*

Les premières données d'entrée du modèle sont relatives à sa topographie. Un modèle numérique de terrain ayant une résolution de 10m ainsi qu'un réseau hydrographique nouvellement cartographié ont été utilisés (Géoportail de la Wallonie, s.d.). Ces deux informations ont été fournies dans le cadre de ce mémoire par la région wallonne.

- *Occupation des sols et délimitation du parcellaire*

Le Top 10V gis définit la classe d'occupation du sol sur l'ensemble du bassin versant étudié. Il a été créé à partir des cartes IGN. De plus, les données du SIGEC permettent de connaître le type de culture sur chacune des parcelles au 15 mai. Ces deux sources d'informations proviennent de la région wallonne et sont utilisées à la création du CODE_UP nécessaire au modèles WATERSED.

- *Précipitation*

Les données de précipitation sont obtenues grâce aux stations de Leuze (26), Geer (30), Couthuin (32), Alleur (33) et Roux-Miroir (39) du réseau Pameseb (Pameseb.be, s.d.). Ces données sont des mesures horaires sur une période comprise entre le 1^{er} janvier 2010 et le 31 décembre 2016. Ces données ont d'abord été projetées sur chacune des stations de mesure du débit selon la méthode

des distances inverses (Équation 2 : Équations décrivant la méthode des distances inverses Équation 2). Cette étape dégage des valeurs de précipitations au sein du bassin versant et de réaliser des hydrogrammes comme explicités ci-après. Ensuite, une valeur moyenne a été obtenue par la méthode des polygones de Thiessen. Cette méthode consiste à spatialiser les données à partir des points de mesures, ou dans mon cas, à partir des données projetées sur les stations de mesure de débit. Cette méthode consiste à dessiner les polygones d'influences de chaque station en traçant les médiatrices des segments qui relient deux stations de mesure voisines. En utilisant l'Équation 3, une valeur pondérée est obtenue pour l'ensemble du bassin versant (Fielder, 2003). Les valeurs des coefficients ainsi que la distance entre les points se trouvent en annexe e.

Équation 2 : Équations décrivant la méthode des distances inverses

$$PP = \frac{a}{d1} * \Delta1 + \frac{a}{d2} * \Delta2 + \frac{a}{d3} * \Delta3 + \frac{a}{d4} * \Delta4 + \frac{a}{d5} * \Delta5$$

$$\frac{a}{d1} + \frac{a}{d2} + \frac{a}{d3} + \frac{a}{d4} + \frac{a}{d5} = 1$$

- Avec, - PP : Précipitation projetée,
 - d : Distance entre le point de mesure des précipitations et le point de projection,
 - a : Paramètre d'ajustement au bassin versant considéré,
 - Δ : Hauteur de précipitation mesurée (mm).

Équation 3 : Équation de spatialisation des précipitations sur le bassin versant par les polygones de Thiessen

$$P_{BV} = \%_1 * \Delta1 + \%_2 * \Delta2 + \%_3 * \Delta3 + \%_4 * \Delta4 + \%_5 * \Delta5$$

- Avec, - P_{BV} : Précipitation spatialisée sur le bassin versant,
 - % : Pourcentage de superficie de bassin versant dépendant du point de mesure,
 - Δ : Hauteur d'eau mesurée (mm).

Le choix des événements de précipitation est réalisé à partir de l'hydrogramme observé en chacune des stations de mesure du débit. À partir de ces graphiques, on sélectionne les événements pluvieux, assez courts et possédants, avant et après celui-ci, des périodes de temps sec, de sorte que l'hydrogramme de crue associé soit bien isolé.

Sept événements pluvieux ont été sélectionnés. Pour chacun d'eux, la hauteur maximale atteinte sur une heure sera prise en compte ainsi que le nombre d'heures pour lesquelles la pluie atteint une valeur de 2 mm au minimum, seuil considéré par le modèle comme ayant un impact sur l'érosion. L'annexe f reprend les dates de début et fin de chacun des événements, la valeur maximale atteinte et le nombre d'heures où les valeurs de précipitation dépassent les 2 millimètres. La période de retour déterminé pour chacun des événements sélectionnés se trouvent en annexe g.

- *Coefficient d'infiltration et concentration en sédiments*

Afin de pouvoir attribuer à chaque type de culture une valeur de coefficient d'infiltration et de concentration en sédiments, un code C-R-F est associé à chaque combinaison de type de culture et type de sol (annexe g). Le facteur C représente le pourcentage de recouvrement par le couvert végétal, le facteur R correspond à la rugosité du sol, i.e. la différence entre le fond de dépression et le lit de débordement, et le Facteur F représente le faciès. Les différentes catégories pour chacun des facteurs se trouvent dans les Tableau 3, Tableau 4 et Tableau 5 (Souchère, 2005).

Tableau 3 : Classe de valeur pour le couvert végétal (Souchère, 2005).

C1	0-30 %
C2	31-60 %
C3	61-100 %

Tableau 4 : Classe de valeur pour la rugosité (Souchère, 2005).

R0	Inférieur à 1 cm
R1	Compris entre 1 et 2 cm
R2	Compris entre 2 et 5 cm
R3	Compris entre 5 et 10 cm
R4	>10 cm

Tableau 5 : Correspondance entre l'état du sol et le faciès (Souchère, 2005).

F0	Etat initial conféré par le travail du sol
F11	Croûte structurale
F12	Croûte sédimentaire dans les dépressions, Croûte structurale ailleurs
F2	Croûte sédimentaire généralisée

Les valeurs de capacité d'infiltration et de concentrations en sédiments proviennent de plusieurs sources en fonction de la nature du sol. D'une part, pour les classes d'occupation 1, 2, 3, 4, 5, et 8 (cultures d'hiver, cultures de printemps précoces, cultures de printemps tardifs, prairies permanentes, cultures permanentes et forêts), les valeurs de capacité d'infiltration et de concentrations en sédiments sont tirées des travaux de Souchère (2005). Ces travaux sont réalisés sur le bassin versant de Blosserville qui a un sol caractérisé d'Orthic Luvisol et un drainage favorable. Ces données ont été obtenues via des mesures et des observations de terrains. Ces valeurs sont donc utilisées pour le type de sol 1, c'est-à-dire des sols limoneux à drainage favorables. Pour les sols

limoneux à drainage modéré ainsi que pour les sols limono-caillouteux, aucune donnée n'est disponible actuellement dans la littérature scientifique.

Pour toutes les autres occupations de sol, différentes de celles précédemment citées, ainsi que pour l'ensemble des occupations de sol sur sol sableux et argileux, les données proviennent de la thèse de Valentin Landemaine (2017). Ces valeurs ont été obtenues grâce à de la littérature et à des expérimentations de terrain (annexe i et j).

Pour la concentration en sédiment dans les eaux, une classification se réalise en fonction de la valeur maximale de précipitation tombée en 6 min. Pour les données horaires, une approximation de classe a été effectuée et se trouve dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Classification des valeurs de concentration en sédiment en fonction de la valeur maximale de précipitation sur une heure

Titre de colonne	Précipitation maximale pour une heure
MES_0_10	Inférieur à 5 mm
MES_10_40	Entre 5 et 10 mm
MES_40	Plus de 10 mm

- *Valeurs d'imbibitions*

Les valeurs d'imbibitions sont données dans l'annexe k. Elles correspondent à la hauteur d'eau qui peut être infiltrée avant d'atteindre un état stationnaire (Souchère, 2005). Différentes classes peuvent être déterminées selon la quantité de précipitations tombées sur les 48h précédentes (Tableau 7).

Tableau 7 : Classification en fonction du cumul de précipitation sur les 48h précédentes

Titre de colonne	Cumul sur les 48h précédentes
Ant_0	Entre 0 et 1 mm
Ant_1	Entre 1 et 16 mm
Ant_16	Entre 16 et 40 mm
Ant_40	Plus de 40 mm

- *Coefficient de Manning*

Les valeurs du coefficient de Manning sont basées sur les données de Morgan (2005). Afin de garder une cohérence de l'ensemble, les choix au sein des gammes déterminées par Morgan (2005) ont été faits en regard des valeurs déterminées par Valentin Landemaine (2017) dans sa thèse (annexe I).

- *Coefficient d'Erodibilité*

Les valeurs des coefficients d'érodibilité sont basées sur la carte du facteur d'érodibilité disponible à la région wallonne. Ces valeurs seront utilisées pour les classes d'occupation 1, 2, 3, 4, 5 et 7 (culture d'hiver, culture de printemps précoce, culture de printemps tardive, prairies permanentes, culture

permanente ainsi que sols nus). Pour les autres classes d'occupations (bâti, forêt, surface en eau, route, chemin et espace vert) une valeur de zéro a été appliquée (Landemaine, 2017).

- *Largeur de cours d'eau*

Une largeur de cours d'eau a été déterminée pour l'ensemble des tronçons présents sur le bassin versant. Des valeurs ont été mesurées pour la Mehaigne et la Rhée de Meeffe lors de plusieurs campagnes (SPW DCENN). Pour les autres tronçons, une extrapolation a été réalisée sur base de la distance entre ces tronçons et les valeurs mesurées.

4. Résultats et discussion

a. Inventaire de terrain

Les tableaux Tableau 8, Tableau 9 et Tableau 10 contiennent les informations recueillies auprès des différentes communes du bassin versant. Ces informations constituent l'ensemble des renseignements obtenus dans le cadre de ce mémoire et sont aussi complète que possible. Néanmoins, il est possible que certaines informations n'aient pas été entièrement fournies et seront donc à compléter lors d'autres enquêtes. L'ensemble de ces points ont été cartographié et sont représentés à la Figure 12

Tableau 8 : Recensement rapports Giser rendu sur le bassin versant de la Mehaigne

n°	Adresse	Informations complémentaires
i	Burdinne – Rue Créneés	Avaloir, fascines, bandes enherbées (B. E.) et fossé parabolique
ii	Héron – Rue du Bois Piron	Neuf fascines, une digue et cinq bandes enherbées (ou actions d'assolement)
iii	Héron – Rue du ver	Un fossé, cinq B.E., cinq fascines, deux anciens chemins à conserver
iv	Héron – Rue de Boingt	Un fossé talus, deux fascines, deux B.E. et une grille d'égouttage
v	Héron – Rue de Montigny	Quatre B.E., six fascines, un muret et un fossé trapèze.
vi	Héron – Rue Pied du Thiers	Enherbement d'un chenal, prolongation de talus, fossé parabolique et B.E.
vii	Héron – Rue Dr. Beaujean	Suppression de diguette, zone de rétention, rehaussement d'allée et B.E.
viii	Héron – Rue du Vivier	Bande enherbée, fossé parabolique
ix	Héron – Rue de la Sarthe	Entretien d'un fossé (+grille), cinq B.E. , dix fascines , un chenal enherbé, une digue et conversion d'un fossé en un fossé à redent.
x	Eghezée – Rue L'Épine	Deux fascines, une B.E. et deux fossés paraboliques
xi	Rue P. Laurent	
xii	Eghezée – Rue du Bocage	Deux B.E., une fascine et trois murets
xiii	Braives – Rue J. Wauters	Six B.E., trois fascines, deux fossés, un avaloir, deux bordures, un dos d'âne et une zit
xiv	Braives – Rue du Bois	Six fascines, neuf B.E., un chenal enherbé, un système de diminution de pertuis, trois dos d'âne, une bordure et une ouverture de fossé
xv	Braives – Draives D'arnes	Deux fascines, deux B.E., un dos d'âne, un barrage de voirie, un fossé parabolique
xvi	Braives – Rue de Vinave	maintien des prairies, B. E., une fascine, un dos d'âne, batardeau et nettoyage de ruisseau

Tableau 9 : Inventaire des aléas d'inondations recensés sur le bassin versant de la Mehaigne

n°	Adresse	Informations complémentaires
1	La Bruyère – Rue du moulin	Débordement et ruissellement de chaussée.

2	Eghezée – Rue du Bocage	
3	Wasseiges – Rue de Meeffe	Importantes coulées de boues en 1990.
4	Wasseiges – Drèves des lorrains	Coulées boueuses en juin 2011.
5	Wasseiges – Rue Neuville (Ambressin)	Coulées boueuses en juin 2011.
6	Villers-le-Bouillet – Rue de la chapelle	Coulées boueuses il y a environ 3 ans.
7	Villers-le-Bouillet – Rue fond de vaux	Coulées boueuses il y a environ 5 ans.
8	Burdinne – Rue de la Burdinale	Derrière la dernière maison.
9	Burdinne – Rue du Bosquet	Après la première maison.
10	Héron – Rue de la Sarthe	
11	Wanze – Antheit (Rue Mulquet)	31/05/16 : Écoulement entre les maisons provenant du champ, inondation du carrefour.
12	Wanze – Antheit (arrière terrain de football)	31/05/16 : Inondations dues à un égouttage bouché (non coordinations des services) solutions proposées : avaloir supplémentaire.
13	Wanze –Grande Ruelle /Rue du centenaire	04/06/2016 : Inondations dues à de fortes pluies, mauvaises canalisations et au talus existant qui se désagrège.
14		
15	Wanze –Rue Val notre Dames	Chemin agricole transformé en ruisseau durant une averse et inondation d'une partie de la route. Solutions proposées : avaloir.
16	Wanze – Fond de Ry (Bas-Oha)	Ruisseau + lacs. Bassins de rétention à proximité du chemin de fer avec grille d'entrée. Lorsque la grille se bouche, inondation sur la rue vers la Meuse en charriant les gravillons vers la route et les voies.
17	Wanze - Rue Fontaine-st-Lambert / Rue George Dispa (Bas Oha)	Ruissellement de campagne avant de rejoindre le cours d'eau. Ruisseau à curer.
18	Wanze – Rue Norbert grain d'orge (Bas-Oha)	31/05/2016 : Fossé à recanaliser. Les modifications apportées par l'agriculteur ne permettent pas de reprendre les eaux du champ.
19	Wanze – Rue bienonsart (Huccorgne)	Problème d'inondations et finalement un changement de sens de culture à modifier les zones inondées.
20		
21	Wanze – Rue N. Evrard (Bas-Oha)	Autour de l'avaloir, petit mur déjà installé pour retenir les boues venant de tout bois.
22	Wanze – Rue Elva / Rue Chénia	Ensemble de différentes cultures, de bordure à 45° au lieu de 90°, non reconstruction des murs de déviation de flux après travaux et le ruissellement arrive aux maisons rue de lavoir (qui fait vallée). Le fossé devrait être aussi recreusé.
23		
24		
25	Wanze – rue Sockeu (Longpré)	La rue sert d'entonnoir aux coulées boueuses venant des champs en amont.
26	Wanze - Vinalmont (Rue	La pente de la rue charrie des gravats. Solutions proposées : deux avaloirs supplémentaires => déviation du ruissellement dans le

	L. Verlaine)	ruisseau.
27	Wanze – Ruisseau du Doyard (Vinalmont)	Ravinement de la berge par le ruisseau, érosion du sentier à proximité.
28	Wanze – Rue Jean Jaurès	si débit trop important : débordement de la partie canalisée pour rejoindre la Mehaigne en aval.
29	Wanze – Rue Raide Vallée (Moha)	2014/2015 : Ruissellement venant de la chaussée et de l'écoulement naturel des champs.

Tableau 10 : recensement des mesures antiérosives installées ou prévues sur le bassin versant de la Mehaigne

n°	Adresse	Types de mesures
a	La Bruyère – (sur Meux et Warisoulx)	Drainage en grès dans beaucoup de champs.
b	Eghezée –Rue P. Laurent	Tournière et fossé à installer (cfr. dossier Giser)
c	Eghezée – Dhuy	Rapport Inassep sur des inondations
d	Eghezée – Upignies	Projet de construction de bassin de rétention (Mehaigne)
e	Eghezée - Longchamps	Projet de construction de bassin de rétention (Mehaigne)
f	Eghezée – Rue du Bocage	Fascine de 140 m à l'arrière des propriétés
g	Burdinne - Rue du Bosquet	Canal creusé le long d'un sentier qui descend le long de la maison
h	Héron – Lavoir	Projet de création d'un bassin d'orage
i	Héron – Rue de la Sarthe	Nouvelle canalisation et relevé des terres devant la maison.
j	Wasseiges – N 624 / spar	Projet de création d'une digue de rétention.
k	Wasseiges – Rue Lucar	Projet de plantation d'une haie.
l	Wasseiges – Rue de Meeffe	Création d'un bassin d'orage en 2010.
m	Wasseiges – Drèves des Lorrains	Création d'une digue de rétention des eaux.
n	Wasseiges – Rue de Neuville	Création d'une digue de rétention des eaux.
o	Wasseiges – Rue Grand Rhée	Projet de création d'une zone d'immersion temporaire.
p	Wasseiges - Rue de Jauche	Projet de réduction d'une bosse au long d'une route et chenal enherbé.
q	Wasseiges – Rue de Hannut	Projet de création d'une digue de terre et de trois zones tampons.
r	Wasseiges – Rue de la Sartre	Projet de création de digue et bassin de rétention.
s	Wasseiges – Rue d'Acosse	Projet de création d'une diguette, d'une bande enherbée profilée ainsi que d'un bassin de rétention.
t	et Rue Ciplelet	

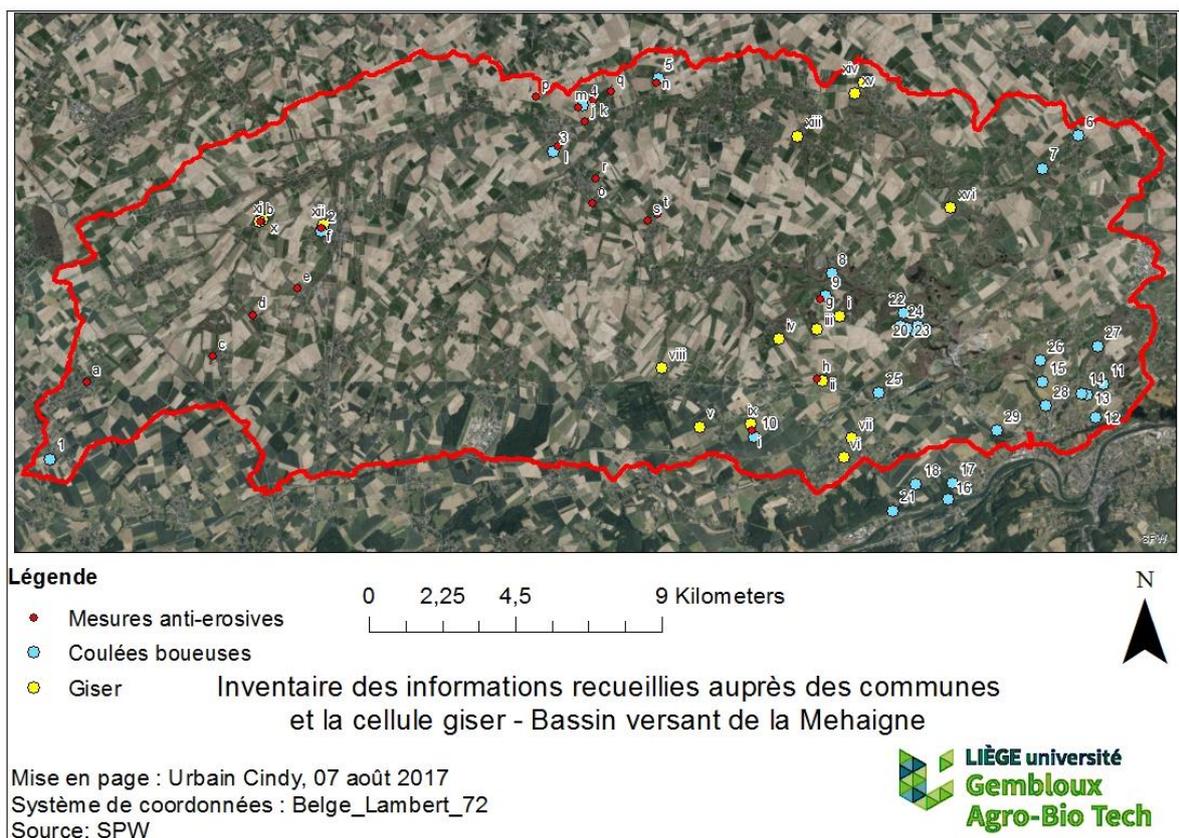


Figure 12 : Localisation des différentes informations récoltées auprès des communes et de la cellule GISER

Quelques autres projets sont en cours de réflexion. Il pourrait être intéressant de se renseigner sur l'avancée de certains d'entre eux afin de mettre en évidence les nouveaux aménagements réalisés par les communes. De plus, une étude annuelle des inondations et des coulées boueuses qui se sont produites les mois précédents, nous donnerait l'accès à des informations plus précises, comme les dates des événements ou encore les axes d'écoulements de ruissellements observés.

Une analyse de données météorologiques qui correspondent aux dates des événements a aussi été effectuée. Seule la commune de Wanze a pu fournir deux dates : le 31 mai 2016 et le 04 juin 2016. L'analyse des données horaires de précipitation nous amènent à observer une valeur de 9,1 mm, relevée le 30 mai 2016 à 11h. Les quelques heures précédant et suivant ce relevé montrent des valeurs comprises entre 4 mm et 0,5 mm avec majoritairement des valeurs inférieures au millimètre. Pour la date du 31 mai 2016, seulement 2 mm ont été relevés en additionnant les trois premières heures de la nuit. Le reste de la journée ne comporte pas de précipitation. Une explication possible à ce décalage serait que le rapport a été écrit le lendemain des événements. Pour la date du 04 Juin 2016, 1 millimètre a été mesuré sur la nuit. Cette valeur ne correspond pas aux informations obtenues par les autorités communales, où l'inondation serait due en partie à de fortes précipitations. Une explication peut être également une erreur de jour. En effet, la journée du 1^{er}

Juin 2016 a comporté un cumul supérieur à 20 millimètres. Avec les précipitations qui se sont produites les jours précédents, une accumulation d'eau peut se produire dans les sols et réduire l'infiltration. Une mauvaise canalisation dans cette zone est également un facteur qui aggrave le problème d'inondations.

b. Quantification de la perte en sol

- *Observations générales*

Dans la suite des résultats, un recadrage de certaines parties du bassin versant a été réalisée afin d'augmenter la visibilité des paramètres discutés. Les conclusions tirées des observations de ces cartes sont applicable à l'ensemble du bassin versant.

Une première observation peut être effectuée sur base de la comparaison de chacun des événements cités précédemment. L'événement 4 montre des résultats particulièrement marqués en comparaison avec d'autres événements qui ne possèdent que peu voir pas de résultats. Une première hypothèse est la durée de précipitation de 1h utilisée dans la modélisation. Un essai a été réalisé avec les données de l'événement 1, également en hiver, en modifiant le temps de précipitation (de 7h à 1h). La variation dans les données de sortie observées confirme cette hypothèse. Une comparaison a également été réalisée avec un jeu de données d'entrées complété pour chacun des pixels pour l'événement 1. La différence présente entre les deux sorties confirme l'impact que peut avoir le manque de données dans la modélisation et décrit également le manque d'informations de certains des événements où l'intensité est de trop grande importance ou pour une quantité trop faible.

Une analyse peut être réalisée sur base d'une comparaison entre les courbes de niveau issues du MNT et les valeurs de l'événement 4 afin de mettre en évidence l'impact du modèle numérique de terrain. La Figure 13 montre l'impact de la topographie sur l'érosion diffuse et concentrée. L'érosion concentrée est présente dans les creux de vallées uniquement. L'érosion diffuse est présente sur les flancs des versants et l'impact de petites variations de topographie est assez visible. Attention à ne pas oublier que le bassin versant est relativement « plat » et empêche d'observer des phénomènes aussi marqués que ce l'on pourrait observer dans d'autres régions.

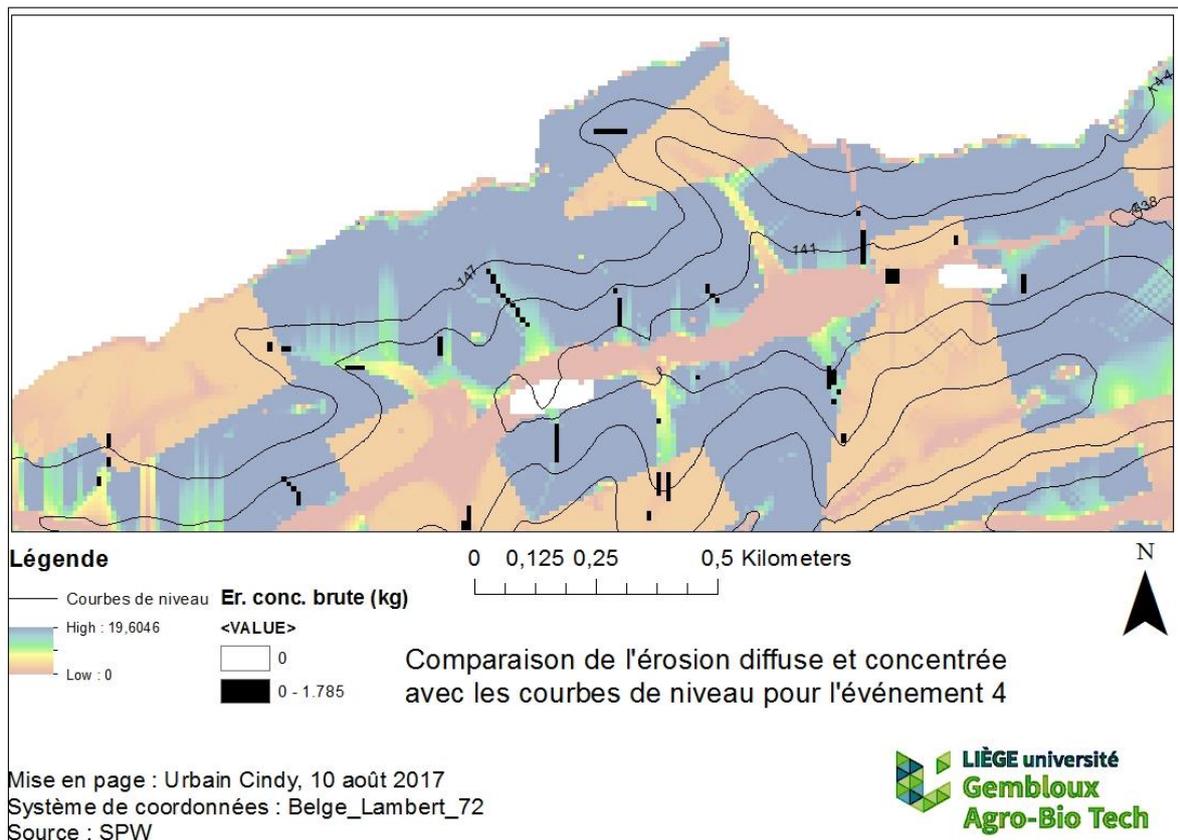


Figure 13 : Comparaison de l'érosion diffuse et concentrée avec les courbes de niveau pour l'événement 4

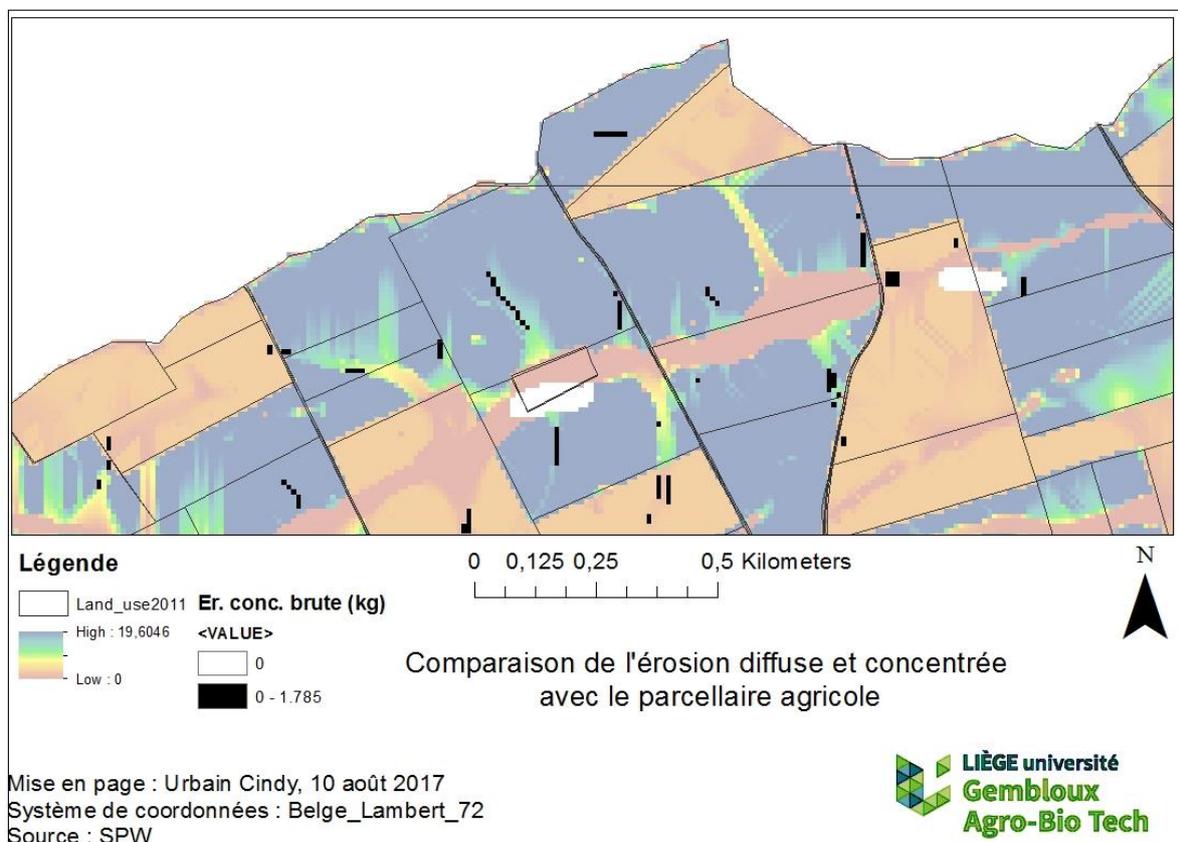


Figure 14 : Comparaison de l'érosion diffuse et concentrée avec le parcellaire agricole pour l'événement 4

La Figure 14 représente la comparaison du parcellaire agricole avec l'érosion diffuse et l'érosion concentrée. Une différence peut être observée sur base de l'érosion diffuse. Les différences remarquées sur cette carte correspondent très nettement au contour du parcellaire agricole.

Au vu de l'ensemble des valeurs d'érosion et dépôts nets du bassin versant pour l'événement 4 (Figure 15), il est possible de constater que les zones sans information se situent principalement aux abords de l'axe d'écoulement. Ces « trous » sont dus aux manques d'informations sur les sols limoneux à drainage défavorable et les sols limono-caillouteux. Les raisons de ces différentes classes de sol et du manque d'informations qui en résultent sont développées ultérieurement. Ces pixels sans résultat ont une influence sur les pixels en amont et donc sur le rendement en sédiment à l'exutoire. L'impact de bois ou de parcelles de prairies présentes le long des berges n'est dès lors pas pris en compte.

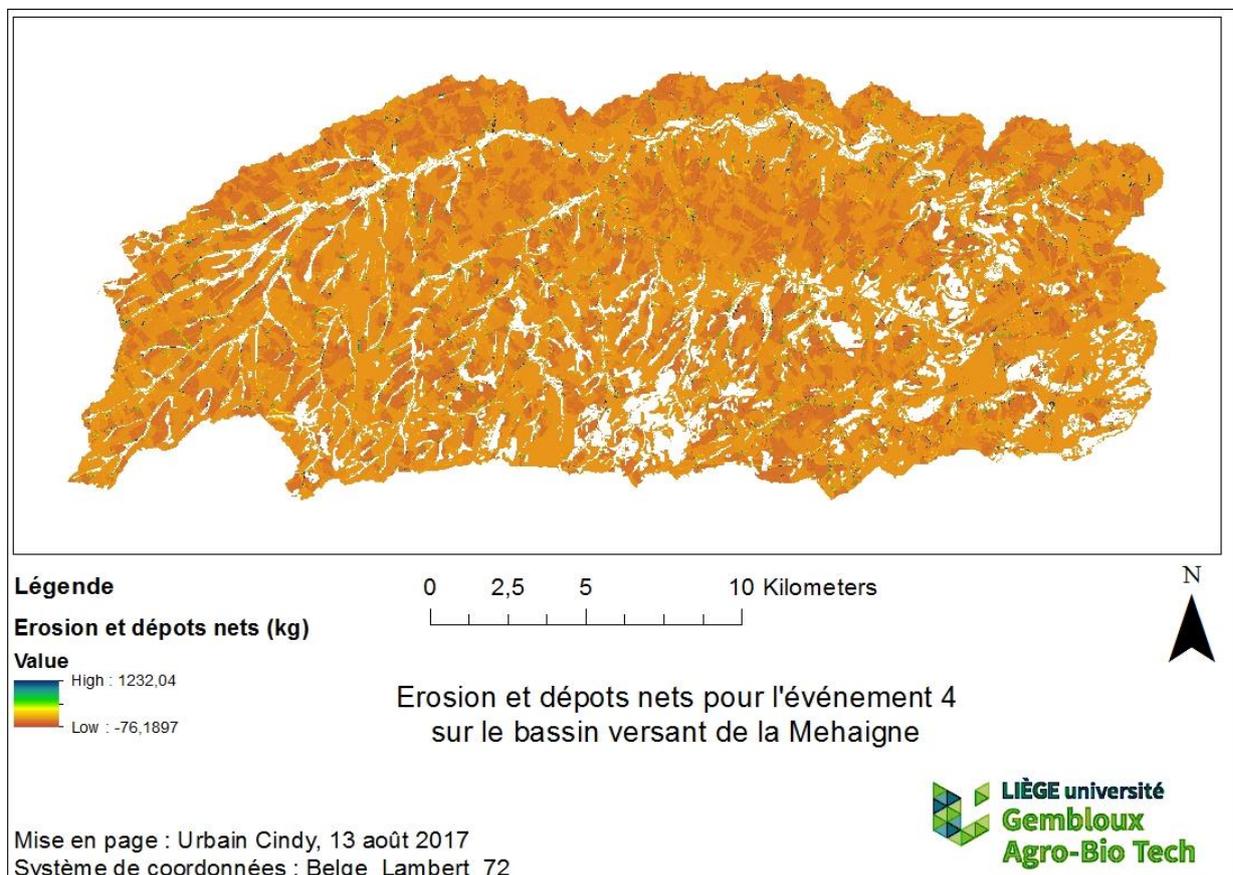


Figure 15 : Erosion et dépôts nets pour l'événement 4 sur le bassin versant de la Meuse

- *Comparaison des zones entre saisons*

Tableau 11: Comparaison des quantités modélisées pour les différents types d'érosion et de dépôts pour chacun des événements

	Érosion concentrée brute (kg)	Érosion diffuse brute (kg)	Érosion et dépôts nets (kg)	Rendement en sédiments (kg)
Hiver (ev 1)	0 – 1223.1	0 – 57.6512	-54.8138 – +594.093	2089.86
(ev 4)	0 – 1785	0 – 19.6046	-76.1897 – +1232.04	99 816.3
Printemps (ev 2)	0 – 733.312	0 – 37.045	-21.9459 – +84.8756	599.084
(ev 6)	0 – 679.37	0 – 26.8994	-11,8315 – +96.3297	463.272
Été (ev 3)	0 – 891.047	0 – 73.6305	-38.0057 – +251.79	1369.29
(ev 5)	0 – 907.065	0 – 83.5845	-36.2764 – +213.156	1193.44
(ev 7)	0 – 1500.95	0 – 173.454	-76.1105 – +205.842	4053.15

L'analyse des valeurs maximales d'érosion brute (concentrée et diffuse), nette ainsi que le rendement en sédiment essaie de dégager une tendance saisonnière dans les phénomènes d'érosion. Une première lecture des données montre que les valeurs les plus importantes sont présentes dans les événements hivernaux pour tous les critères précédemment cités à l'exception de l'érosion diffuse brute, pour laquelle les valeurs maximales sont situées en été.

Ce tableau (Tableau 11) présente également les rendements en sédiments à l'exutoire, qui sont beaucoup plus grand pour les événements 1, 4 et 7, autrement dit, pour les deux événements d'hiver ainsi que pour un événement d'été. Les événements 1 et 7 ont un cumul de précipitation deux fois supérieur aux cumuls des autres événements. L'événement 4 ne comporte lui qu'une durée d'une heure ce qui rend les événements plus intenses. La faiblesse du nombre d'événements ne peut dégager conclure davantage sur l'impact des événements saisonniers.

Tableau 12 : Quantité moyenne d'érosion diffuse brute par événement pour cinq occupations de sol

	Ev 1	Ev 2	Ev 3	Ev 4	Ev 5	Ev 6	Ev 7
11	385.56	0.5	0.0015	44333.06	0.5	0.295	1949.1
21	0.63	1.63	0	282.66	1.63	2.1	39.95
31	11.242	0.76	0.068	1441.6	0.76	0	310.72
41	7.27	1.74	2.59	98.4	1.74	1.034	154.1
71	19.4	5.19	20.75	4.87	5.19	6.75	43.82

Tableau 13 : Quantité moyenne d'érosion concentrée brute par événement pour cinq occupations de sol

	Ev 1	Ev 2	Ev 3	Ev 4	Ev 5	Ev 6	Ev 7
11	645.76	52.31	86.82	104260.23	65.56	50.24	1490.79
21	9.8	0	3.59	2063.62	2.009	0	26.06
31	392.44	145.45	272.45	11977.17	238.35	90.55	663.77
41	0	0	0	0	0	0	0
71	1.97	0	0	3.75	0	0	0

Une comparaison des valeurs moyennes obtenues pour chaque combinaison de classe d'occupation de sol peut également être effectuée. Les tableaux Tableau 12 et Tableau 13 présentent les valeurs pour les trois types de cultures ainsi que pour les parcelles de prairies permanentes et de sols nus pour la classe de sol nu bien drainé. Le choix de ce type de sol a été effectué car elle possède toutes les données d'entrées ainsi que toutes les combinaisons d'occupations de sol. La première observation qui peut être perçue concerne les sols nus, pour lesquels seuls les événements d'hiver subissent de l'érosion concentrée. À l'opposé, tous les événements perdent des sédiments via de l'érosion diffuse. Mis à part les trois événements les plus extrêmes, les valeurs des pertes en sols nus ont un facteur 5 à 10 en comparaison aux valeurs modélisées sur les parcelles de culture. Une deuxième observation consiste en une comparaison entre les trois types de cultures pour chacune des saisons. En hiver, ce sont les cultures d'hiver qui sont les plus problématiques. En effet, ces cultures sont semées en automne et le manque de recouvrement des sols entraîne plus d'érosion que sur les parcelles de cultures de printemps (tardives ou précoces). Ces parcelles ont des cultures intermédiaires telles que les fèves ou la moutarde qui ont une meilleure couverture que les cultures d'hiver. De la même manière, les cultures de printemps précoces sont plus problématiques pendant le printemps. En été, les données des divers événements donnent des résultats différents en regard de l'érosion diffuse, bien que les prairies soient les éléments les plus problématiques dans deux des trois événements. Pour les érosions concentrées, les principales cultures problématiques sont les cultures de printemps tardives. Celles-ci regroupent une majorité de cultures sarclées et entraînent, de par leurs pratiques culturales, un facteur plus important dans les risques de concentrations de ruissellement. Pour ce qui est des prairies permanentes, les seules pertes recensées sont sous formes d'érosions diffuses. Ces valeurs, comme pour toutes les autres, sont des valeurs moyennées de chacun des pixels ayant le même CODE_UP mais en ne tenant pas compte de leur position en amont ou en aval ni du type d'occupation en amont. Il est possible que ces quantités proviennent des cultures en amont. Une comparaison avec la carte d'occupation du sol montre que les parcelles sont principalement à proximité des cours d'eau et sont généralement de forme allongée, perpendiculaire à l'axe de ruissellement. Cette localisation confirme l'explication de dépôts de sédiments.

- *Comparaison de l'approche parcellaire et bassin versant*

L'intérêt d'utiliser un modèle avec une approche bassin versant est de quitter l'approche parcellaire, présente dans d'autres modèles. Effectuer une telle modélisation donne une vue globale des risques de pertes en terres à l'échelle du bassin versant. Il est aussi possible de comparer les données obtenues au sein des cours d'eau pour voir si elles correspondent à une réalité de terrain, mais également si les diverses portions du bassin versant réagissent différemment. Dans le cas de ce

mémoire, c'est ce point qui est le plus intéressant afin de prédire les zones les plus contributrices au bassin versant.

Les résultats présentés dans le cadre de ce travail montrent l'impact du mélange des différents types de cultures entre les parcelles agricoles. Les modèles précédents, tels que STREAM, offrent des résultats dans lesquels les parcelles n'ont pas de signes d'interactions entre elles. Dans le cas du modèle WATERSED, une interaction est visuellement observable entre les parcelles. Cela invite à une évolution dans la compréhension des phénomènes des pertes en sol et de rétention des sédiments au sein du bassin versant. Sur la figure Figure 16, un phénomène de rétention peut être observé entre les parcelles. Les pertes qui se sont produites sur des parcelles d'hiver sont arrêtées par les parcelles de cultures de printemps situées en aval. Cette observation découle de par le stade de développement des cultures. Les cultures d'hiver sont au stade juvénile en hiver et ne recouvrent pas une partie majeure du sol. À l'inverse, les parcelles de cultures de printemps sont recouvertes par une culture intercalaire qui possède en hiver un taux de couverture végétale plus important et donc une meilleure rétention des sédiments. Cela ouvre la porte à de futures analyses dans une optique de potentiels nouveaux aménagements fonciers ruraux.

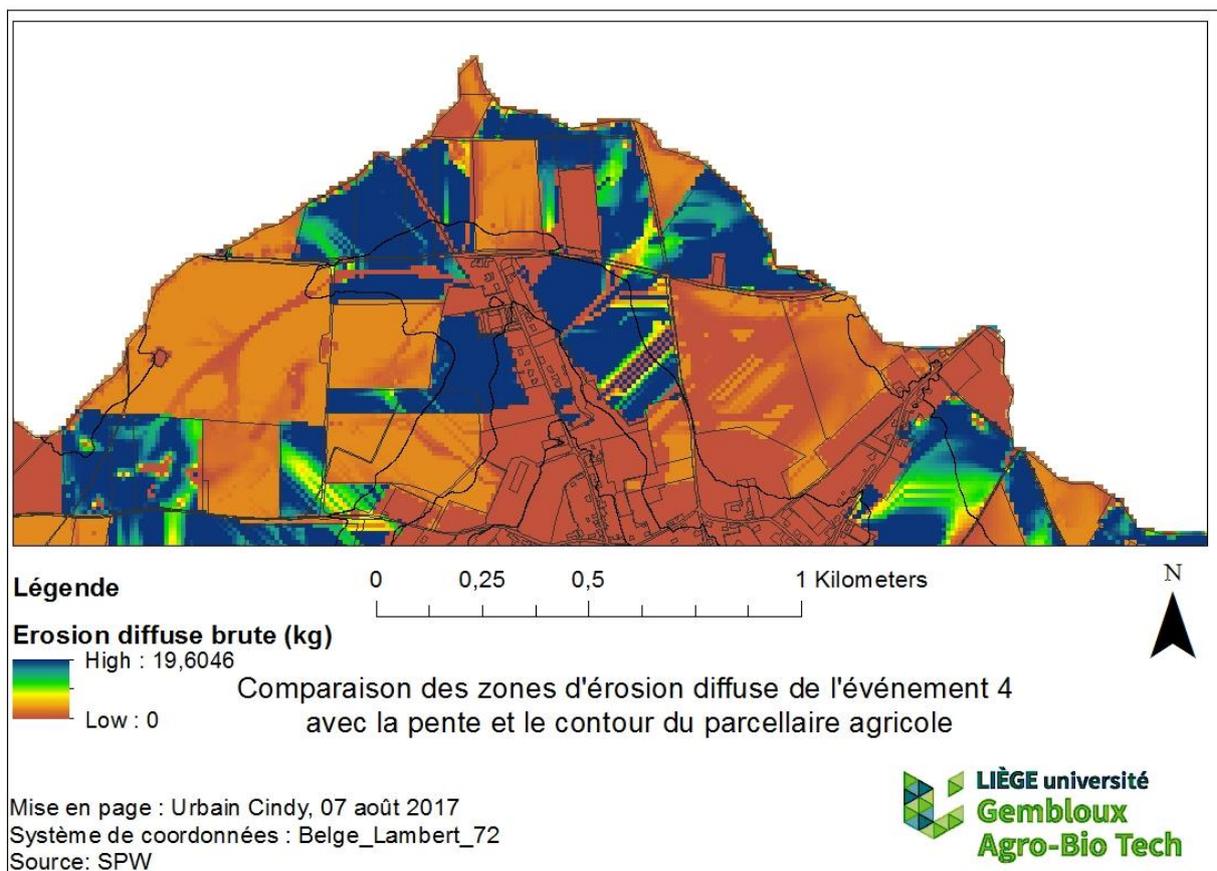


Figure 16 : Comparaison des zones d'érosion diffuse de l'événement 4 avec la pente et le contour du parcellaire agricole

- *Comparaison des modèles USLE ou MUSLE avec le modèle Watersed*

Le modèle Watersed se distingue des précédentes approches telles que USLE et MUSLE. Le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) se compose d'une équation basée sur six paramètres : l'érodibilité, l'érosivité, le pourcentage et la longueur de pente, le couvert végétal ainsi qu'un facteur d'utilisation du sol. Cette équation prédit le taux d'érosion sur base d'une pluie moyenne annuelle (Blum et al., 2011). Le modèle MUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) quant à lui utilise des pluies de projets. Il est fondé sur les mêmes paramètres que le modèle USLE, qui ont été complétés par nouvelles expérimentations, non encore réalisées lors de la première publication du modèle USLE (Renard et al., 1991). Il se limite cependant à obtenir une quantification des pertes en sol à l'exutoire du bassin versant considéré. Le modèle Watersed détermine lui des pertes en sol sur l'ensemble du bassin versant. Ce modèle donne une valeur des pertes en sol pour chacun des pixels de la zone modélisée. Ces résultats constituent une approche novatrice dans l'optique de recherches futures sur l'érosion des parcelles agricoles. Cette spatialisation est une évolution non négligeable dans la perspective de modélisations futures.

- *Validation du modèle*

Une validation par comparaison avec les ortho-images est possible comme cela est illustré sur la Figure 17. Toutes les zones d'érosion ne sont pas facilement identifiables sur les ortho-images. Cela est dû à la date à laquelle l'image a été prise. Celle-ci ne correspond pas nécessairement aux périodes des événements et donc au couvert végétal correspondant. Néanmoins, une concordance est visible entre les axes de ruissellement modélisés pour l'événement 4 et l'ortho-image, ce qui confirme cette validation.

Une comparaison avec la carte d'erruissol (Figure 18 : Comparaison de la carte d'erruissol (érosion concentrée) avec les zones d'érosion concentrée déterminées pour l'événement 4.) montre que les zones d'érosion concentrées sont situées sur les axes déterminés selon l'équation de Wischmeier (1978). Une concordance entre les premiers modèles développés et leur évolution peut ainsi être observée.

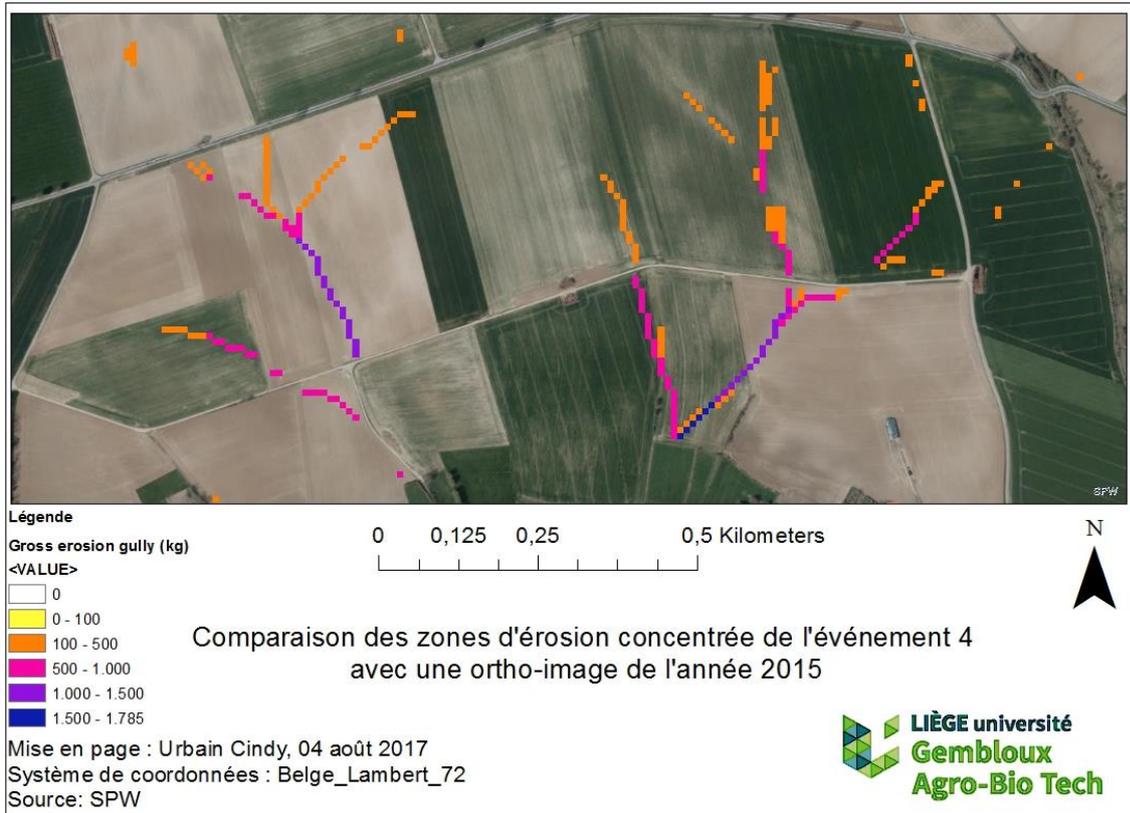


Figure 17 : Comparaison des zones d'érosion concentrée de l'événement 4 avec une ortho-image de l'année 2015

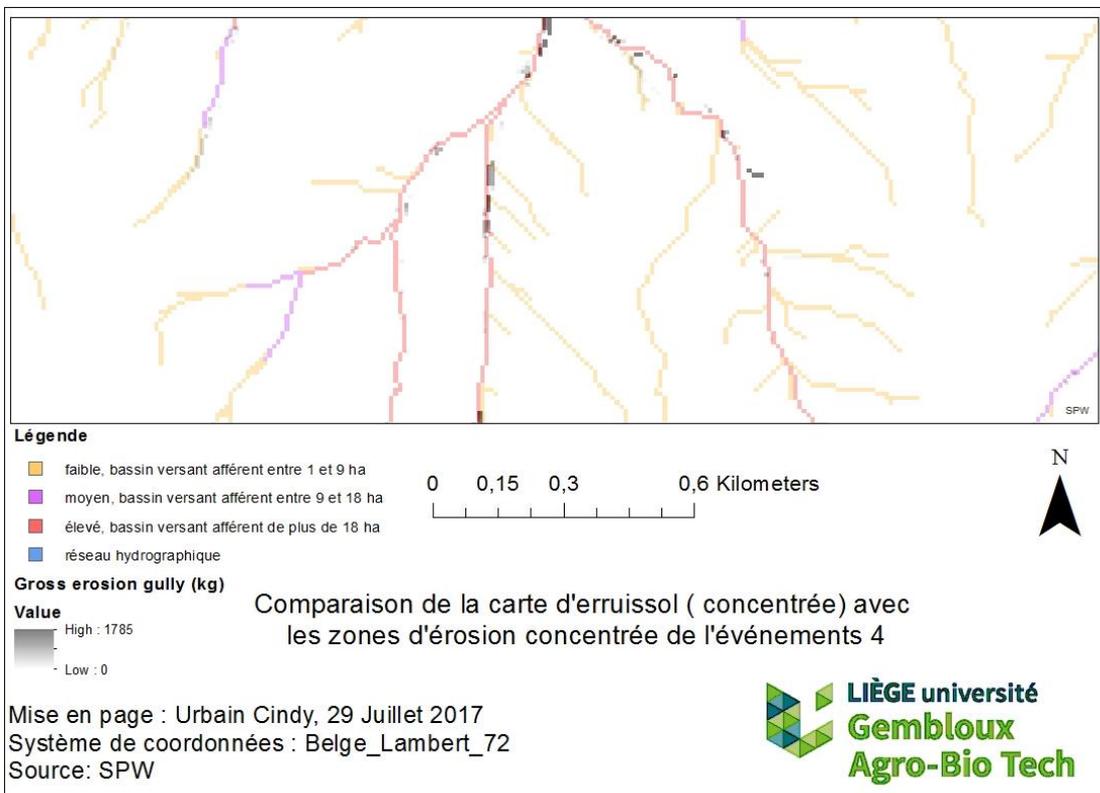


Figure 18 : Comparaison de la carte d'erruissol (érosion concentrée) avec les zones d'érosion concentrée déterminées pour l'événement 4.

Une comparaison avec l'inventaire de terrain peut être réalisée afin d'apporter une validation supplémentaire au modèle. Les aléas 4 et 5 de l'inventaire de terrains (Tableau 9) situés sur la commune de Wasseiges ont eu lieu en juin 2011. L'événement 2 correspond à une pluie de 28,56 millimètres pour une durée de 8 h. Cette durée dilue l'intensité de la précipitation et ne permet pas de visualiser des traces d'érosions au niveau de ces aléas, situé proche de l'exutoire. La comparaison s'effectue donc avec l'événement 4 qui a des valeurs plus marquées. La carteFigure 19 représente la carte d'érosion et dépôts nets aux abords des deux points d'aléas. Au niveau de la Drève des Lorrains (point 4), aucun impact n'est visible mais sur la rue Neuville (point 5), les traces d'érosion sont bien visibles. Que ce soit pour la quantité de sédiments comme pour l'excédent de précipitation, un apport inquiétant arrive sur la rue Neuville comme indiqué par les autorités communales. Néanmoins, les informations reçues de la commune de Wasseiges ne mentionnent qu'un nom de rue et non une localisation précise au sein la rue. Le manque de résultats pour l'événement 2 n'empêche pas qu'il y ait eu une inondation à cette période. En effet, cet événement a été sélectionné pour la mise en évidence d'un pic au sein de l'hydrogramme unitaire et de sa réponse à l'exutoire du bassin versant.

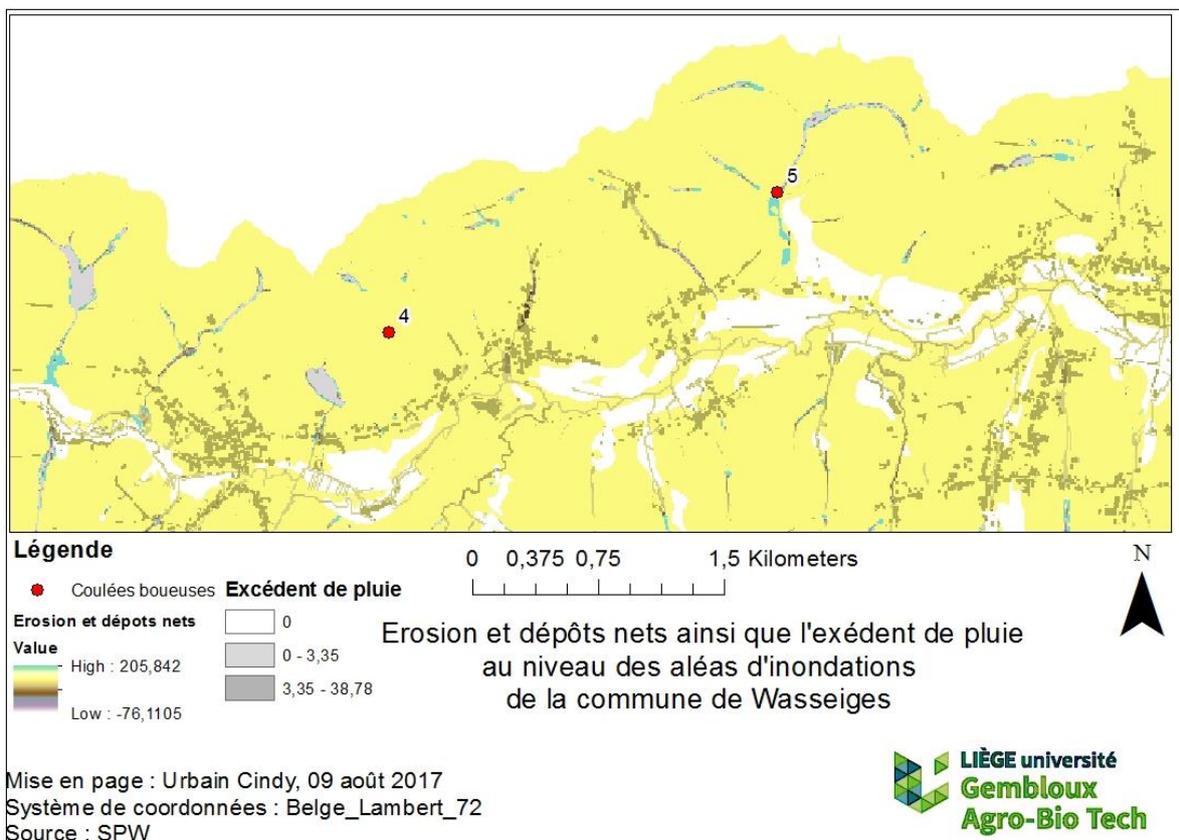


Figure 19 : Erosion et dépôts net ainsi que l'excédent de pluie au niveau des aléas d'inondation de la commune de Wasseiges

c. Connectivité hydrologique

La connectivité hydrologique réalisée au sein de ce mémoire permet de déterminer les zones fournissant le plus facilement des sédiments à l'exutoire. Comme détaillé dans le matériel et méthodes, les facteurs qui influencent le plus la connectivité hydrologique sont la longueur du trajet, la pente ainsi que la superficie en amont du pixel considéré. Sur la Figure 20, la longueur du trajet est visible en comparant les sous-bassins versant de la Burdinale et de la Fosseroulle avec le reste du bassin versant. Les deux sous-bassins versant ont majoritairement des teintes bleues, en opposition avec le reste du bassin versant majoritaire dans les teintes rouges, ce qui correspond aux valeurs les plus faibles et donc atteignant le plus rapidement l'exutoire. De plus, les parcelles situées sur une zone de pente ont une connectivité plus forte que les zones en de crêtes, relativement planes. Dans la partie amont, les zones de crête sont marquées et visibles en rouge alors que les zones de vallées sont notifiées en bleue, symbolisant comme expliqué ci-dessus un apport plus aisé à l'exutoire.

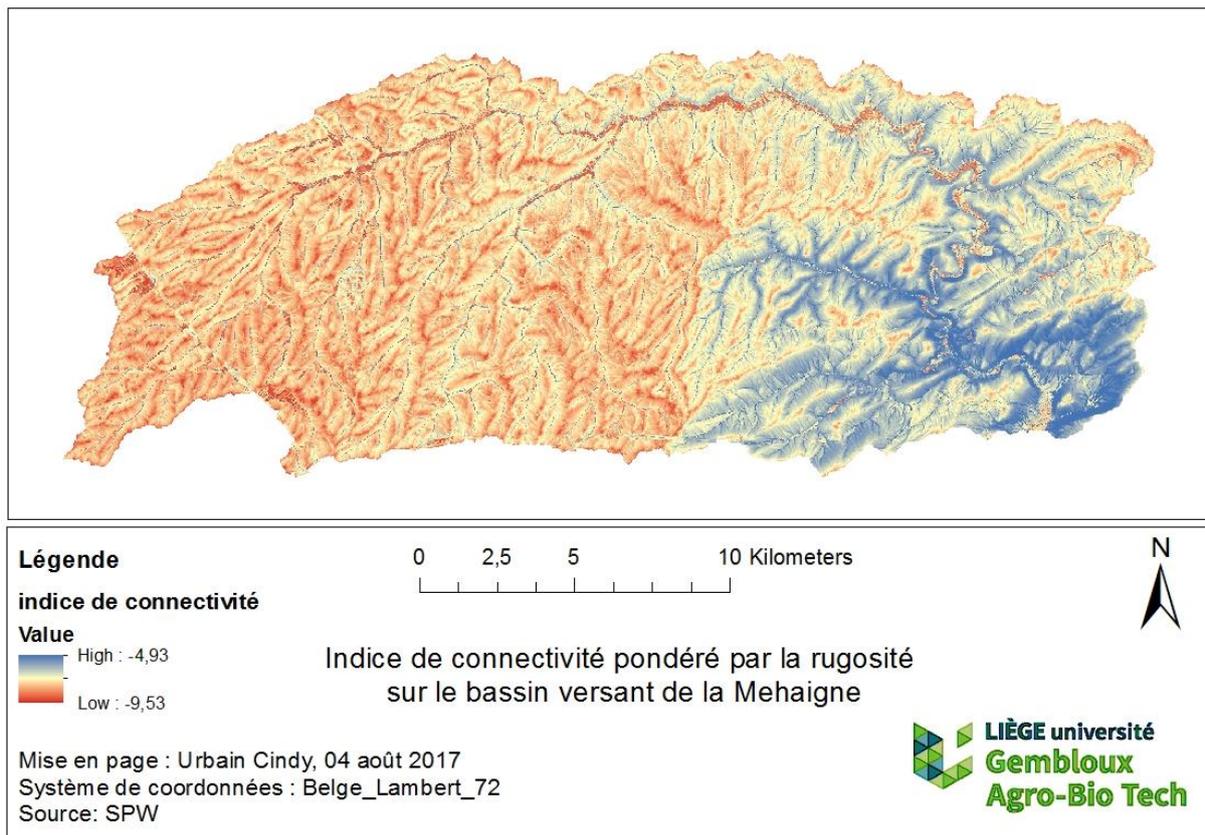


Figure 20 : Indice de connectivité pondéré par la rugosité sur le bassin versant de la Meuse

Une analyse peut également être effectuée sur un sous-bassin versant afin de déterminer l'impact de la taille des parcelles agricoles sur les mouvements des sédiments et leur facilité de transport jusqu'à l'exutoire. Cette analyse a pu être réalisée sur base du nouveau parcellaire agricole et pondéré par le

facteur cultural comme détaillé dans le matériel et méthodes. L'intérêt d'utiliser ces valeurs de facteur cultural est de trancher de façon la plus marquée possible les limites de parcelles. La Figure 21 représente l'indice de connectivité pour des parcelles de 50m de largeur. L'annexe m comprend la représentation des indices de connectivités pour les parcelles de 10, 100, 200 et 400 m de largeur.

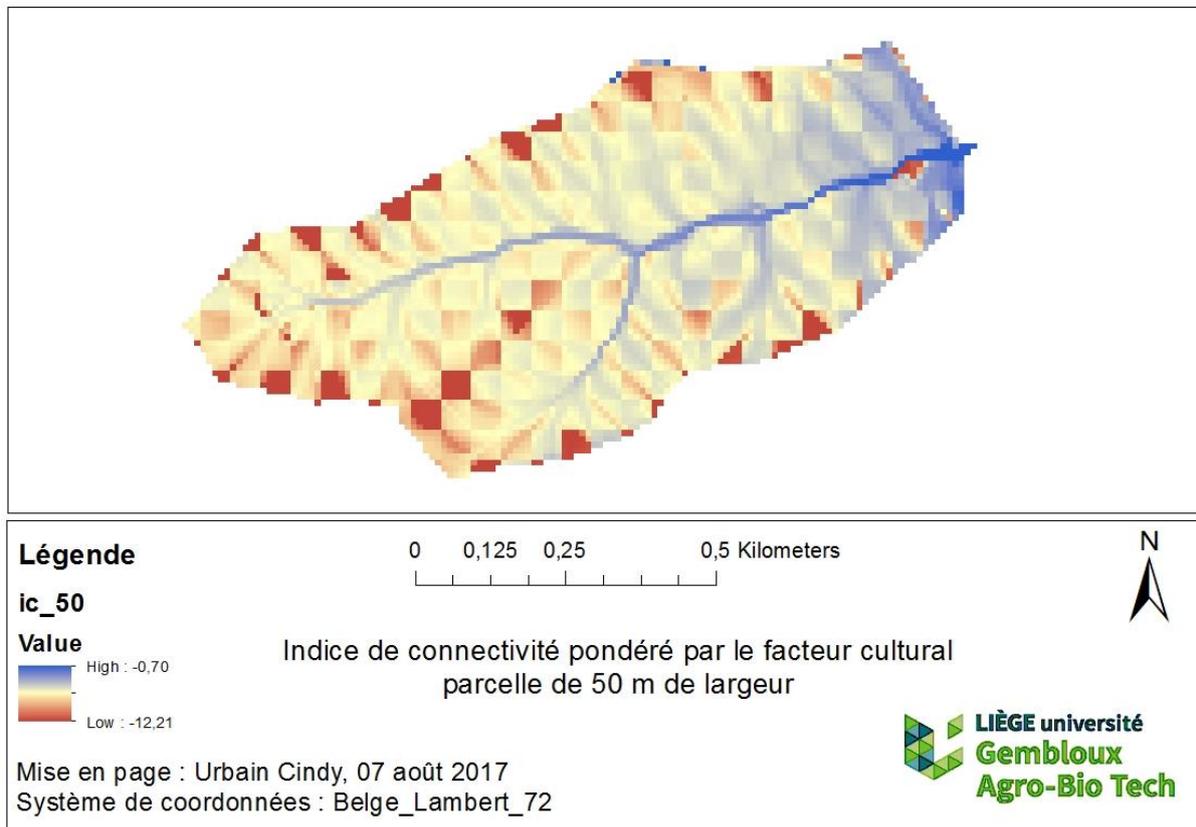


Figure 21 : Indice de connectivité pondéré par le facteur cultural - parcelle de 50 m

Une constatation qui peut être faite est la différence marquée d'indice de connectivité entre les parcelles, surtout pour celles de grandes tailles (200 et 400m). Pour des parcelles plus petites, de 100 m voire 50m de côté pour les pentes plus imposantes, l'indice de connectivité ne présente pas de différence marquée et montre même une tendance à une homogénéité pour une pente et une distance par rapport à l'exutoire défini. Cette observation tend à montrer que la réduction de capacité de transport par l'utilisation de culture à faible facteur cultural n'est pas envisageable pour des parcelles de faible taille. La présence des prairies se marque de nouveau sur les parcelles de 10m de côté. Cependant, cette dimension est trop petite pour avoir un intérêt et une praticité pour les agriculteurs. Finalement, suite à une comparaison de ces cinq dimensions de parcelles, il est possible de montrer que chaque type de culture est possible tant qu'elle est entourée de parcelles avec un

facteur cultural plus faible. Il est également raisonnable de veiller à conserver des cultures à faible connectivité hydrologique sur les axes d'écoulement afin de réduire leur vitesse de transport.

Afin de montrer une relation entre le modèle WATERSED et le modèle de connectivité hydrologique, il est possible de comparer les valeurs d'érosion avec les valeurs de connectivité hydrologique, ici pondérée par la rugosité. La figure Figure 22 illustre cette comparaison et permet de montrer une similarité des axes d'écoulement préférentiels. Cela prouve que du point de vue topographie, les deux modèles répondent de manière cohérente et apportent une certaine validité au modèle.

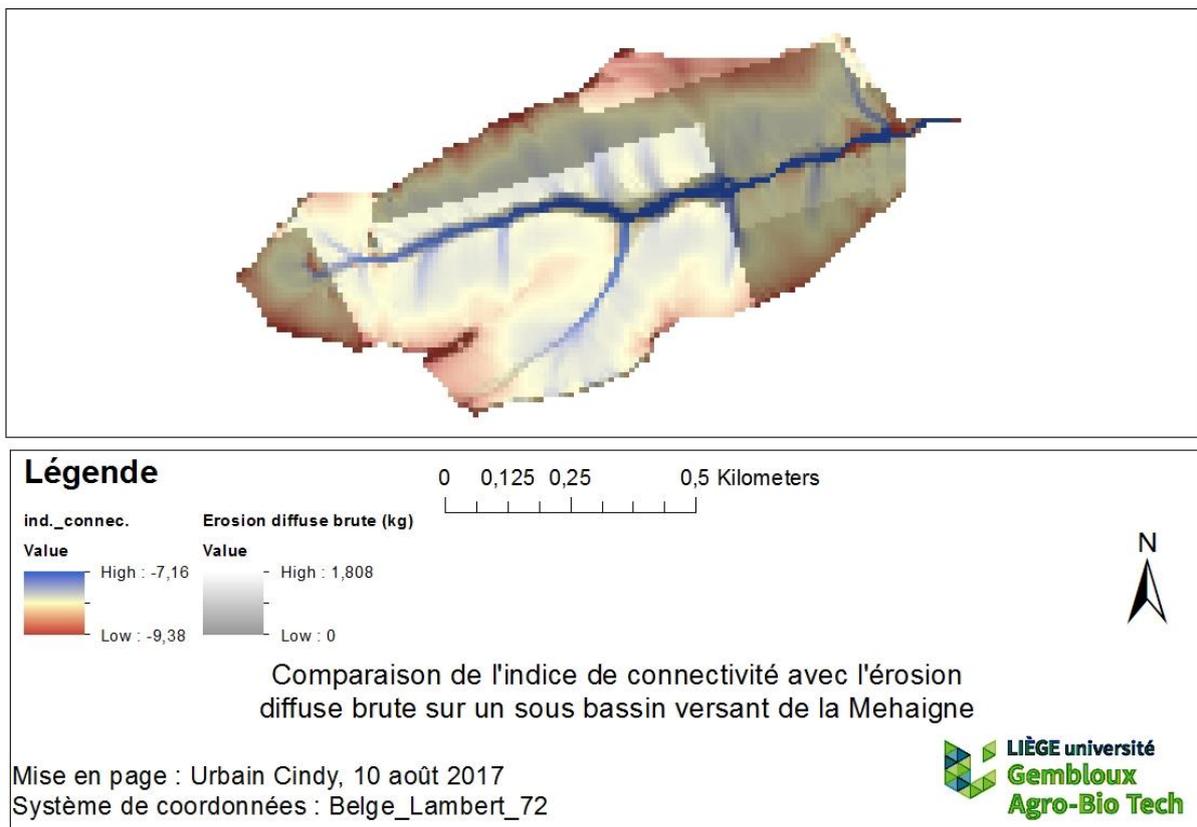


Figure 22 : Comparaison de l'indice de connectivité avec l'érosion diffuse brute sur un sous bassin versant de la Meuse

d. Zone à risques sur le bassin versant

Une carte zones prioritaires peut être modélisée sur base des cartes d'érosions et de dépôts nets. Pour chaque événement, une reclassification est effectuée selon les critères suivants : pour tous les pixels dont la valeur est inférieure à -1 kg, une valeur de -1 est attribuée, entre -1 et 1 kg, un 0 est assigné et finalement pour les pixels de plus de 1kg, une valeur de 1 est assignée. Ensuite, ces sept cartes nouvellement classifiées ont été additionnées. Les pixels avec des valeurs de -7 correspondent aux pixels pour lesquels une perte en sol a été modélisée sur chacun des événements. À l'inverse, les

valeurs de +7 sont les zones où il y a toujours du dépôt. Entre les deux, plusieurs combinaisons de valeurs peuvent se produire sur bases des différentes précipitations modélisées.

Pour chacune des zones présentées ci-dessous, une carte représentant le CODE UP attribué à chacun des pixels est fournie en annexe n.

Une première zone mise en évidence se situe sur la commune de Fernelmont (Figure 23). Il s'agit d'une zone de sol nu située en amont d'une zone de culture d'hiver. En aval de cette zone, dans un creux de la topographie, des zones de dépôt sont constatées. La quantité de dépôts dominante sur cette zone plutôt que sur d'autres de même type de culture et de la même pente s'explique par la quantité supérieure de sédiments apportée par la zone de sol nu. Néanmoins, un équilibre se réalise entre ces deux types de sol et les particules libérées en amont n'atteignent pas les cours d'eau, et ne contribuent donc pas à l'envasement des frayères.

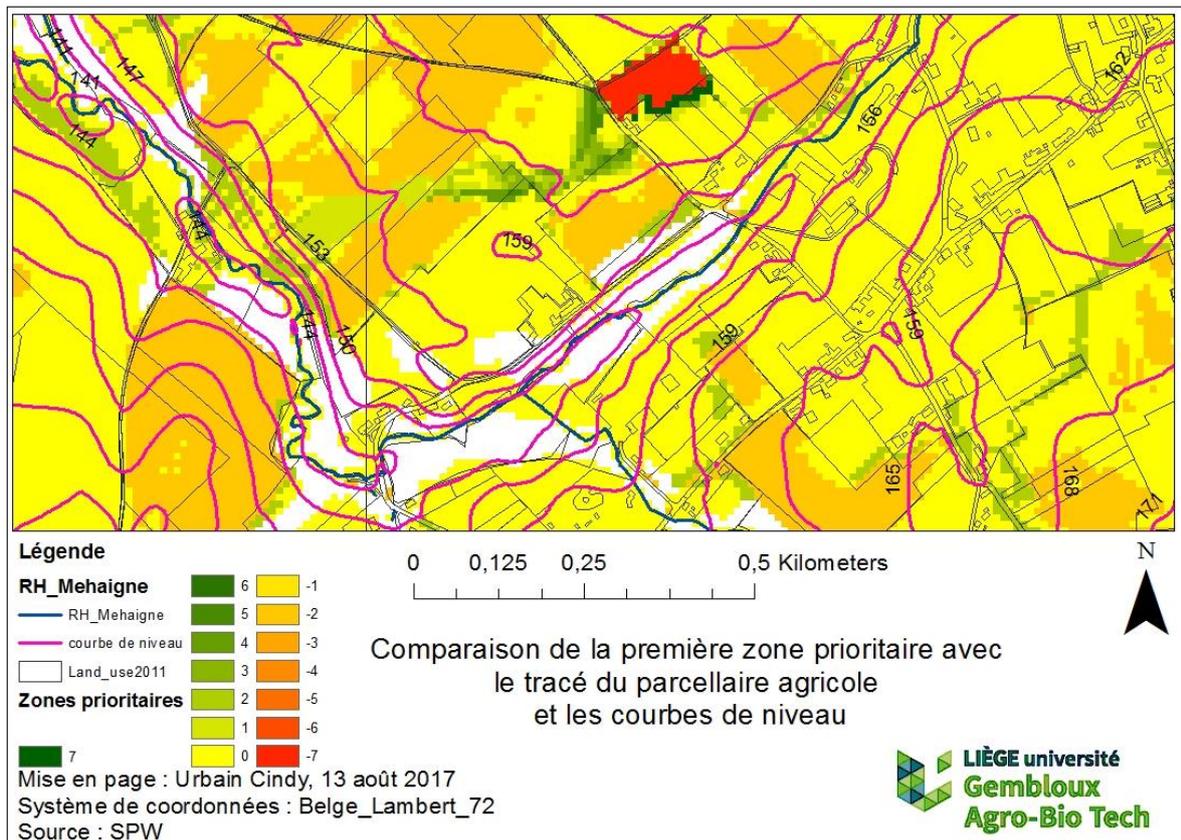


Figure 23 : Comparaison de la première zone prioritaire avec le tracé du parcellaire agricole et les courbes de niveau

Une seconde zone est présente à Wanze (Figure 24). Il s'agit également d'une zone de sol nu, mais avec en aval des espaces verts et des cultures d'hiver. De la même manière, des zones de dépôt se situent dans le creux de vallées en amont, là où les pentes sont de plus faibles intensités (au niveau des cultures d'hiver). Cependant, une partie de la zone en amont est située sur du limon sableux et

ne comporte, dès lors, aucune information en fichier de sortie. Au niveau de la connexion au cours d'eau, la majorité des pixels se situe en 0, ce qui signifie que ces zones sont neutres pour l'ensemble de ces événements. Un axe se distingue avec une valeur de -3 et s'écoule vers le cours d'eau. Il serait intéressant de contrôler, sur le terrain, les éléments constitutifs des parcelles d'espaces verts afin de savoir si des aménagements doivent être effectués ou si ces éléments constitutifs représentent déjà un frein non modélisé dans ce mémoire.

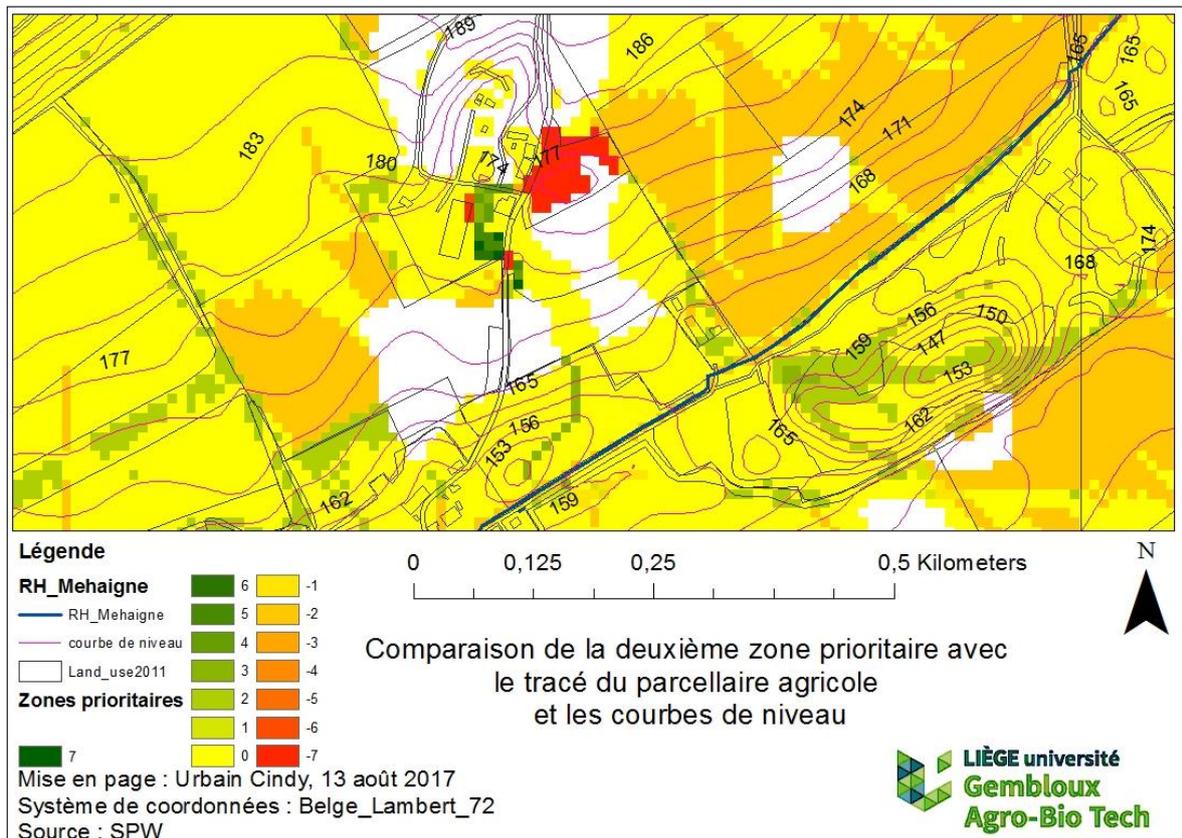


Figure 24 : Comparaison de la deuxième zone prioritaire avec le tracé du parcellaire agricole et les courbes de niveau

Des zones de sol nu sont également présentes et comportent, en bordure aval de celles-ci, une bande de forêt. Cette bande a des propriétés de rétention de sol qui préserve le cours d'eau de cette parcelle de sol nu. Une autre parcelle de sol nu est également présente dans le bassin versant mais à proximité de berges. Cette zone est à traiter prioritairement (figure **Figure 25**). De plus, ces zones sont placées sur les pentes plus importantes ce qui aggrave le risque d'érosion. La carte présente la location des trois zones présentées ci-dessus au sein du bassin versant de la Meuse.

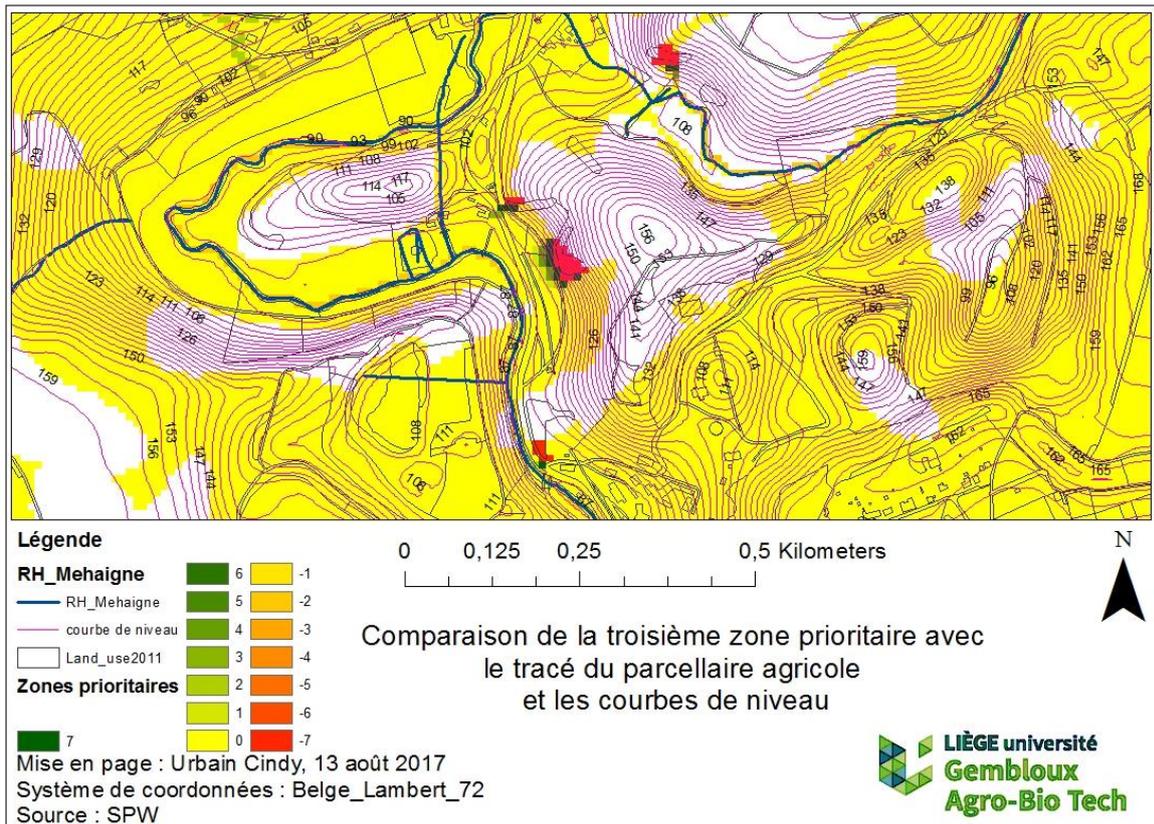


Figure 25 : Comparaison de la troisième zone prioritaire avec le tracé du parcellaire agricole et les courbes de niveau

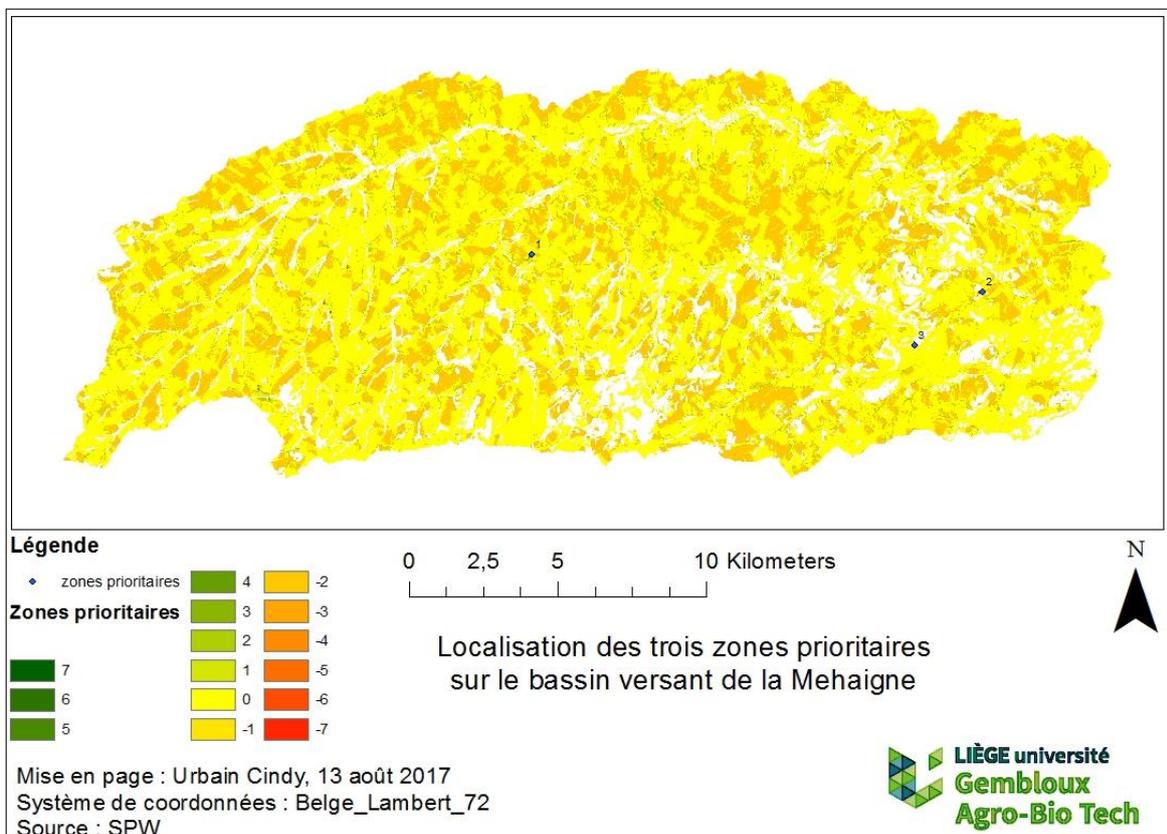


Figure 26 : Localisation des trois zones prioritaires sur le bassin versant de la Mehaigne

Finalement, plusieurs zones d'habitation sont considérées comme des zones de pertes pour l'ensemble des événements. Ces habitations sont situées à proximité des berges d'un cours d'eau et sont à l'aval de cultures de printemps tardives. Les pixels encodés en bâti ne perdent pas de sol, mais ont une capacité d'infiltration nulle. Cette imperméabilité influence le dépôt éventuel qui provient de l'amont : les terres passent sur le pixel sans déposer de sédiment. Dans la réalité, le bâti représente des infrastructures d'une certaine hauteur, laquelle n'est pas prise en compte dans le modèle. Selon le même principe, quelques pixels de route sont également repris comme des zones de pertes significatives. Pareillement, des cultures de printemps sont présentes en amont des pixels concernés.

e. Choix des données d'entrée

Lors du choix des données d'entrée, un certain nombre d'hypothèses ont dû être faites et sont donc discutables.

Tout d'abord, un shapefile qui regroupe l'occupation du sol, le parcellaire agricole ainsi que la couche des principaux sols de Wallonie doit être créée pour pouvoir attribuer un « CODE_UP » à chacun des pixels. La conversion des données du format shapefile au format raster, nécessaire à la modélisation, entraîne un phénomène de superposition. En effet, les polygones qui représentent des routes, par exemple, sont parfois plus étroits que la résolution du raster, dans cette modélisation prévue à 10 m. Selon la proportion d'occupation par le polygone sur la cellule du raster, cette cellule peut prendre une autre occupation que la route. Ce phénomène provoque une discontinuité dans le tracé de ces éléments, ce qui peut avoir de l'influence lors de la modélisation. L'exemple d'une route a ici été choisi, cependant ce phénomène s'applique à tous les polygones de faible largeur ainsi qu'au pourtour de tous polygones. Il est nécessaire de veiller à comparer les données issues du land use avec les ortho-images, aucun critère n'a pu différencier les routes des chemins. L'ensemble de ces polygones ont donc été répertoriés en tant que route et aucun code chemin n'est présent dans cette modélisation.

Ensuite, afin d'éviter au maximum la création de puits, qui modifierait les résultats, les portions de cours d'eau non liées au réseau hydrographique principal, ou sortant du bassin versant par un autre point que l'exutoire, doivent être enlevées avant la modélisation. C'est le cas quand la source du cours d'eau est proche du pourtour du bassin versant. Toujours en fonction de la résolution, un ou deux pixels peuvent sortir du bassin versant. Les portions non reliées sont, elles, causées par la non-représentation des portions canalisées du réseau hydrographique et sont donc ôtées. Il y a

cependant un risque d'oubli de quelques petites portions qui n'influencent que très localement la valeur des pixels voisins.

Pour poursuivre sur la thématique des cours d'eau, peu de données chiffrées sont disponibles pour définir leur largeur. Une extrapolation linéaire a donc dû être effectuée entre les portions où une valeur est disponible, ainsi qu'entre ces portions et l'amont ou l'aval du réseau hydrographique. Pour cette extrapolation un gradient de valeurs des plus faibles aux plus fortes a été utilisé de l'amont vers l'aval. Toutefois, une partie du Rhée de Meffe a été plus complètement cartographiée et des variations non linéaires de la largeur sont constatées, le cours d'eau s'élargit avant de se rétrécir. Il serait donc utile de modifier la carte des largeurs en fonction des données récoltées lors de nouvelles études. Les données de largeur devraient faire partie du nouveau réseau hydrographique, en cours de réalisation au sein de la région wallonne.

Les données de précipitation ont été obtenues par tranches horaires pour la période du 1^{er} janvier 2010 au 31 décembre 2016. Comme les stations se trouvent en dehors du bassin versant de la Meuse, un double traitement a dû être réalisé pour ramener les données au sein du BV avant de les spatialiser. Vu que l'ensemble du bassin versant a la même valeur de précipitation totale, la variabilité spatiale, imaginable au vu de la taille du bassin versant, n'est pas représentée. De plus, une extrapolation, basée sur la valeur horaire maximale doit être réalisée afin d'obtenir une gamme de hauteur de précipitation à six minutes (Tableau 6). Utiliser de telles mesures réduirait l'incertitude liée à cette extrapolation.

Le choix des cinq catégories de sol a été fait par rapport à la texture mais aussi à la qualité de drainage dans le cas des sols limoneux. Ce choix se distance de la thèse de Valentin Landemaine, où seule la texture a été prise en compte, afin d'utiliser les données plus détaillées dont nous disposons pour les sols wallons. Une importante simplification a néanmoins dû être faite pour passer des vingt types de sols selon la carte des principaux types sols de Wallonie à 5 catégories. Malgré ces choix simplifiés, il y a un manque de données marqué dans la littérature scientifique. Seulement deux auteurs ont publié des données de capacité d'infiltrations et de concentrations en sédiments pour des sols limoneux (Evrard, 2008a ; Souchère, 2005). Les expériences effectuées pour obtenir ces données ont été réalisées sur des bassins versants plus petits avec un sol de texture homogène. Dans les deux cas, les limons possèdent un drainage favorable et ne peuvent donc être utilisés que pour la classe de sol 1 (Tableau 2 : Code de classification en fonction de la nature pédologique) Le choix des données déterminées par Souchère (2005) se fait sur base de la quantité d'informations disponibles. Dans les tableaux d'Evrard (2008a), tous les états de surface (i.e. C-F-R) ne sont pas réalisés, dont

certaines nécessaires à cette modélisation. À l'inverse, l'article de Souchère (2005) donne ces informations pour tous les états de surface, ce qui justifie mon choix malgré la localisation du bassin versant (Blosseville, dans la ceinture loessique française). Il est à noter que selon Evrard (2008a), la concentration en sédiment dans les eaux de ruissellement ainsi que la capacité d'infiltration diffèrent des données de Souchère mais également des bassins versants localisés en France utilisés par ce dernier. Il serait intéressant de réaliser à nouveau cette modélisation avec des données d'Evrard complétées. Néanmoins, 87,3 % du bassin versant comporte des données pour chaque raster d'entrée du modèle. Cette superficie reste une quantité d'informations acceptables pour la modélisation. Le tableau Tableau 14 reprend la superficie de chaque catégorie de sol ainsi que le pourcentage du bassin versant utilisé. Le pourcentage de sol argileux et sableux est très faible, les approximations qui proviennent de l'utilisation des données de Valentin Landemaine ne sont donc pas considérées comme problématiques.

Tableau 14 : Superficie et pourcentage d'occupation de chaque type de sol modélisé sur le bassin versant de la Mehaigne

Code_sol	Superficie (km ²)	Pourcentage du bassin versant (%)
1	317.12	85.93
2	34.26	9.28
3	12.71	3.45
4	2.11	0.57
5	2.83	0.77

Il serait également précieux de réaliser des analyses de terrains afin d'obtenir les valeurs de capacité d'infiltration et de matière en suspension pour les sols limoneux moins drainés ainsi que pour les sols limono-caillouteux. La base de données pour les sols argileux et sableux se fonde sur les travaux de Valentin Landemaine (2017). Il serait donc aussi intéressant de réaliser les expérimentations sur des sols sableux et argileux en Wallonie afin de comparer ces données à celles utilisées et, au besoin, d'adapter les données d'entrée.

Les valeurs d'imbibition sont dépendantes des mêmes remarques que celles expliquées ci-dessus. En effet, l'attribution de ces valeurs se réalise grâce aux valeurs de capacité d'infiltration. L'affinement et l'attribution des données manquantes entraîneront ainsi une amélioration des données d'imbibition.

Les données d'érodibilité sont issues d'une carte disponible sur le géoportail de la Wallonie. Celles-ci ont été déterminées sur base de la nature du sol et de sa teneur en matière organique. Cette carte correspond à un sol nu. Idéalement, des mesures devraient être faites pour adapter ce paramètre à

chaque catégorie de cultures. L'impact de la remarque ci-dessus est à garder en mémoire à la lecture des résultats.

Enfin le paramètre de rugosité de Manning a été déterminé sur base de la table de Morgan (2005). Cette table donne une gamme de valeur pour une série de surfaces. Le choix du coefficient de Manning au sein de cette gamme se réalise de manière arbitraire. Pour les prairies permanentes comme pour les cultures, le choix peut se faire sur base d'une estimation de la taille des plantes à la période considérée. Afin de conserver une homogénéité entre les catégories d'occupations de sol urbanisé, le même coefficient de rugosité de Manning sera appliqué à ces catégories sans tenir compte de la catégorie de sol.

Plus généralement, une analyse de sensibilité pourrait être réalisée pour toutes les données d'entrée. Cela permettrait de tester l'impact de chacun des paramètres sur les différents événements modélisés, de déterminer lesquels ont le plus d'influence sur chaque type d'érosions et d'analyser de manière plus approfondie chacun des résultats du modèle.

Lors de l'utilisation du modèle, quatre paramètres peuvent être utilisés pour affiner les réglages de celui-ci (annexe a). Sous les recommandations de Valentin Landemaine, la modélisation a été effectuée avec les paramètres de base du modèle. Il serait néanmoins intéressant, dans un second temps, de réaliser une analyse de sensibilité de ces différents paramètres afin de sélectionner la combinaison la plus adéquate en regard des caractéristiques wallonnes. Cela nécessiterait néanmoins une quantification chiffrée précise des pertes à l'exutoire du bassin versant modélisé.

La modélisation présentée ci-avant a été réalisée sur base du parcellaire agricole anonyme 2011. L'ensemble des zones problématiques présentées ci-dessus le sont pour une occupation de sol donnée. Elles correspondent aux parcelles avec une perte en sol quel que soit l'événement pluvieux. La modélisation sera donc à recommencer avec les parcellaires des années suivantes, afin de tester l'ensemble des rotations pratiquées. Si une perte est constatée pour chacun des événements ainsi que pour chaque rotation, des mesures pourraient être envisagées afin de prévenir l'envasement du cours d'eau.

Une approximation a été faite en regroupant les événements en saison selon leurs dates. Le couvert végétal peut évoluer de manière assez conséquente au cours d'une saison. Selon la culture, le pourcentage de celui-ci peut varier de catégorie au cœur d'une saison. Pour cela, des observations de

terrains pourraient être réalisées chaque mois afin d’ajuster le paramètre C du code C-R-F (table XYZ) et ainsi affiner les valeurs de capacités d’infiltrations, d’imbibitions et de matière en suspension.

f. Analyse de sensibilité des paramètres d’entrées

Afin de tester les variations qui pourraient être engendrées par une variation de valeurs d’entrée, une analyse a été réalisée sur l’événement numéro 4. Le choix de cet événement a été effectué grâce à la visualisation possible des différentes parcelles sur la cartographie. Afin d’avoir une comparaison similaire indépendamment des différents types de sol, le test a été réalisé avec des données d’entrées de 90 % et de 110 % de la valeur de base de matière en suspension.

Une rapide analyse détermine quelles couches seront impliquées par cette modification. Il s’agit des couches d’érosion diffuse brute (kg), d’érosion et de dépôts nets (kg), la couche de variation de hauteur (m) ainsi que le rendement en sédiment (kg) et les concentrations de sédiment en suspension (g/l). Dans chacune de ces couches, on constate qu’aucune variation cartographique n’est observable entre les trois pourcentages modélisés, mais des changements dans les valeurs de pixels sont présents. Cela signifie que les variations entre les différentes occupations de sol ont une tendance à être plus proportionnelle. Ces constatations peuvent être expliquées sur base des formules décrites en annexes a. Les données de matière en suspension entrées dans le modèle sont utilisées dans le calcul de l’érosion diffuse (annexe a formule 8). Les érosions et dépôts nets sont calculés sur base de cette érosion diffuse, ce qui justifie les modifications de valeurs (annexe a formule 16). De la même manière, les rendements en sédiment seront impactés (annexe a formule 19). Les concentrations de matières en suspension (annexe a formule 22) sont également calculées sur base des valeurs de matières en suspension encodées en entrées du modèle. Elles constituent ainsi les derniers éléments influencés par le facteur d’entrée ayant subi l’analyse de sensibilité.

En comparant les valeurs du tableau Tableau 15 : Quantité de sédiments modélisés pour différentes quantités de matière en suspension, il est visible que la variation de concentration en matière en suspension de 10 % n’entraîne pas de variation similaire dans les valeurs de rendement en sédiments, où une variation de 4 % est constatée dans les deux cas. Bien que les valeurs diverses, le modèle montre une certaine robustesse. Une analyse similaire peut être effectuée sur chacune des données d’entrée du modèle.

Tableau 15 : Quantité de sédiments modélisés pour différentes quantités de matière en suspension

	Dépôt et érosion net (kg)	Erosion diffuse brut (kg)	rendement en sédiment (kg)
MES -10%	-66.7168 à 1199.08	17.6442	95 741.2
MES 0%	-76.1897 à 1232.04	19.6046	99 816.3
MES +10%	-76.482 à 1264.97	21.5651	103 857

5. Propositions d'actions prioritaires

Plusieurs pistes de solutions seront discutées dans la suite de ce mémoire. Globalement, il est préférable de prendre des mesures qui réduiront la production des sédiments au sein des parcelles. Ces mesures sont essentiellement des pratiques agricoles telles que l'augmentation de la quantité d'humus dans les couches superficielles, le passage en culture de non-labour, l'utilisation de barbutte dans les cultures de pommes de terre ou de maïs ou encore de réduire la superficie de sol nu entre les cultures par le semi-direct. Ensuite, des mesures de rétention des sédiments seront également développées. Celles-ci sont utiles lorsque la formation de sédiment est trop importante et comportent donc des risques pour la sécurité et la salubrité publique d'une part et l'écologie d'autre part.

L'augmentation de la quantité de matière organique dans les couches superficielles du sol comporte de nombreux avantages. Premièrement, la teneur en matière organique est un paramètre capital de l'érosion de même que la texture, la structure, le taux d'infiltration et la perméabilité (Blum et al., 2011). Une teneur en matière organique plus haute réduit les risques de compaction, l'augmentation des processus biologiques (micro-organismes et vers de terre) ainsi qu'en réduisant la densité apparente du sol. Cette réduction de compaction facilite l'accès aux minéraux en profondeur pour les racines. Pour les agriculteurs, ces pratiques apportent de meilleurs rendements des cultures (Mamman et al., 2007). Ensuite, la matière organique a également un effet sur le rejaillissement des particules. Augmenter la teneur en matière organique accroît l'agrégation du sol mais aussi réduit l'érodibilité et la sensibilité à la compaction et à l'encroûtement. D'autres effets sont également associés à cet apport, comme une meilleure activité biologique, un taux d'infiltration supérieur, une réduction du taux de ruissellement venant de l'amont ainsi que de la charge en particules dans les eaux de surface (Blum et al., 2011). L'apport de matière organique peut être réalisé par une non-récolte d'une quantité des parties non-utilisables de la plante (pailles, par exemple). Ces résidus créent de petits barrages qui retiennent l'eau et augmentent son infiltration. Cela constitue un avantage non négligeable dans la lutte contre l'érosion. Par leur dégradation, ces résidus constitueront un apport en matière organique qui enrichira le sol (McCarthy et al, 1993). L'augmentation de matière organique peut également être effectuée par un apport de fumier sur les cultures.

Les pratiques agricoles ont un impact fondamental sur l'érosion. Les pratiques culturales engendrent un taux d'érosion plus important que celui de l'érosion par l'eau (précipitation et ruissellement) ou par le vent (Blum et al., 2011). Les pratiques telles que le labour sont généralement opérées dans le sens de la pente et entraînent des mouvements de sol dans le sens du mouvement de la machine.

Cependant, à cause de la gravité, les particules parcourent un plus long trajet dans le sens amont-aval qu'aval-amont. Selon Zang et al. (2009), le non travail du sol serait un moyen de réduire les déplacements des particules vers l'amont et donc l'érosion aratoire. Une comparaison des taux d'érosion entre un sol travaillé et non travaillé montre une différence de 64 % en faveur des sols non travaillés. Dans le cas où le travail du sol serait obligatoire pour les agriculteurs, il est possible d'effectuer un travail du sol selon les courbes de niveau. Cette technique coupe la longueur de pente et ainsi réduire l'érosion en favorisant la réinfiltration d'une partie de l'écoulement. Des études réalisées en Espagne ont montré une réduction de 51 % du déplacement de sol en comparaison au travail dans le sens de la pente (Poessen et al, 1997).

D'autres facteurs jouent également sur la compaction des sols comme le poids des machines agricoles, qui engendre une compaction en profondeur des terres sous les lignes de passages. Une réduction du nombre de passages de tracteurs ainsi qu'une amélioration de la conception des machines réduiraient cette compaction.

Peu de zones sont problématiques sur l'ensemble des événements pluvieux. Premièrement, les parcelles de sols nus devraient idéalement être recouvertes par un couvert végétal du type des prairies permanentes. Pour l'année modélisée, un équilibre entre les sols nus et les parcelles en amont peut être observé. Cet équilibre devrait être conservé chaque année afin de préserver le cours d'eau des apports volumineux en sédiments. Il est difficilement possible de combiner les choix des pratiques utilisées par les différents agriculteurs propriétaires de ces terres. Des mesures de types bandes enherbées peuvent également être placées sur le côté le plus en aval de la parcelle de sol nu afin de réduire l'apport en sédiment vers les cultures et ne pas apporter de contraintes supplémentaires. Pour les cas où un axe d'écoulement se détache, un chenal peut être aménagé, de préférence enherbé. Si le débit est trop important, des redents peuvent être installés afin de retenir une partie de l'écoulement et de favoriser l'infiltration.

D'autres mesures peuvent être prises comme placer des fascines, vivantes ou mortes, afin de diminuer la quantité de sédiments dans les eaux de ruissellement. L'inconvénient des fascines mortes est la nécessité de remettre des fagots à l'intérieur des piquets si celles-ci sont en saule ou de remplacer les ballots dans le cas des fascines de pailles. L'idéal serait de placer les fascines vivantes, ce qui nécessite seulement des tailles. Cependant, la pose de ce type de fascine nécessite un accord du propriétaire de la parcelle sur laquelle elle est posée. De la même manière, une haie peut également être placée afin d'avoir la même action qu'une fascine vivante. Une fascine morte combinée à une haie pourrait être placée afin d'avoir la protection de la fascine pendant que la haie se densifie et s'installe correctement.

Les bandes enherbées sont un moyen efficace de réduire la quantité de ruissellement et avec cela, la quantité de sédiments. Selon Le Bissonnais et al. (2004), une bande enherbée de 6 m retient entre 56 % et 100 % du ruissellement en fonction de l'événement (80 % en moyenne). À cela s'ajoute une rétention des sédiments qui diminue la charge du ruissellement d'un facteur quatre. Une analyse réalisée toujours par Le Bissonnais et al. (2004) a démontré que les sédiments déposés au niveau de bandes enherbées comportent une granulométrie supérieure (sable et limon grossier) alors que les particules exportées comptent approximativement le double d'éléments fins (argile et limon fin) en comparaison aux granulométries des surfaces des sols étudiés. Finalement, une réduction des pertes en sol a été obtenue avec l'utilisation de bandes enherbées.

L'ensemble des mesures proposées dans ce mémoire ne sont réalisables que sur base volontaire des agriculteurs et propriétaires. Une compensation financière est à envisager pour indemniser l'agriculteur de la perte de superficies cultivables et peut servir d'incitant auprès des agriculteurs. L'importance de cette compensation, supérieure au coût de sa perte, peut servir de motivation pour la pose et les modifications des pratiques agricoles des agriculteurs concernés.

En Wallonie, les Mesures Agro-Environnementales et Climatiques (MAEC) sont disponibles pour un certain nombre d'aménagement. Elles se basent sur l'engagement volontaire des agriculteurs à favoriser les bonnes pratiques agricoles. Les engagements s'effectuent pour une durée de cinq ans et sont accessibles à tout agriculteur dont le siège d'exploitation se situe sur le territoire belge et qui tient un registre d'exploitation. Quel que soit l'engagement, une série d'obligations devront être suivies afin d'atteindre aussi pleinement que possible les objectifs la mesure antiérosive. Des solutions de rétentions de sédiments et de ralentissements de flux sont possibles. Des bandes aménagées pour la lutte contre l'érosion (MC 8b) peuvent être placées en bas de parcelles de cultures sous labour (zone de thalweg) ainsi que sur les zones de coupures de pentes. D'autres MAEC de bandes aménagées peuvent également être envisagées dans certaines parties du bassin versant afin de poursuivre un maillage écologique. Les parcelles aménagées (MC 7) constituent une MAEC complémentaire aux tournières enherbées et aux bandes aménagées, qui se distinguent de ces dernières par leur caractère non linéaire. En effet, des parcelles polygonales sont possibles mais nécessitent le passage d'un conseiller. Ces parcelles sont utilisables en lutte contre l'érosion qu'en préservation de la qualité des eaux et de la biodiversité. Des haies et des alignements d'arbustes (MB 1a) peuvent également obtenir du financement. La conversion de parcelles en prairies naturelles (MB2) et en prairies inondables (MC3) est également prévue dans les MAEC afin de favoriser l'infiltration, réduire l'érosion et l'impact de crue grâce à une zone de rétention.

6. Perspectives

Diverses perspectives sont possibles pour poursuivre ce mémoire dont certaines d'entre elles ont déjà été discutées dans les résultats et discussions.

Premièrement, il est possible de réaliser une analyse de sensibilité de différents paramètres d'entrée afin de juger de l'impact de chacun sur les résultats. Quelques expériences de terrain pourraient confirmer voire compléter les valeurs de capacité d'infiltration et de matière en suspension en comparaison aux valeurs obtenues par Evrard (2008a) et Souchère (2005). De plus, un calibrage du modèle WATERSED sur base de valeurs mesurées sur un bassin versant belge, tels que celui d'Hevillers permettrait d'attribuer une valeur adaptée aux 4 paramètres d'ajustement du modèle. Des modifications de la valeur de différents seuils utilisés dans le modèle WATERSED pourraient également être réalisées, comme le seuil d'inclinaison de pente dans le choix des algorithmes concentrés ou diffus (annexes a). Cela approfondirait la connaissance dans le fonctionnement du modèle et de poursuivre la connaissance des différents apports du modèle.

L'approximation sur le regroupement des saisons a été déjà discutée précédemment. Les observations de terrain sont proposées pour améliorer la détermination du code C-R-F (annexe h) ainsi que les valeurs de capacités d'infiltrations, d'imbibitions ainsi que de matières en suspension.

Dans la même optique que celle développée précédemment, il est important de compléter les données de départ avec de nouvelles expérimentations, notamment pour les sols limoneux mal drainés et les sols limono-caillouteux. Une analyse sur les sols sableux et argileux amènerait une comparaison des valeurs utilisées par Valentin Landemaine et au besoin déboucherait sur une adaptation des données d'entrée du modèle.

Augmenter l'exactitude des données, notamment pour la largeur des cours d'eau et le modèle numérique de terrain pourrait améliorer la qualité des valeurs de sortie. Diverses mesures de terrains pourront compléter les largeurs de cours d'eau. Des moyens techniques plus puissants rendraient possible l'utilisation d'un modèle numérique de terrain avec une résolution de 1 m. Cela pourrait réduire le problème de chevauchement lors de la conversion du format shapefile au format raster.

Les données de précipitations utilisées dans le cadre de ce modèle ont un pas de temps d'une heure. L'utilisation de données mesurées avec un pas de temps de 6 min faciliterait l'attribution des données de concentrations en sédiments et de ne plus avoir à sélectionner la colonne adéquate sur base des valeurs maximales horaires. De plus, étendre la sélection des événements sur un nombre d'années plus conséquent améliorerait le nombre d'événements qui ont une quantité d'événements

extrêmes avec une durée courte pour une intensité élevée, à l'image de l'événement 4. Ces nouveaux événements augmenteraient le nombre de modélisation avec des résultats plus marqués sur l'ensemble du bassin versant.

Recommencer les modélisations avec un parcellaire agricole différent de celui de 2001 montrerait si les zones problématiques se répètent chaque année ou si ces zones varient en fonction des pratiques culturales. Ces modélisations devraient idéalement se faire sur base des données d'entrée complétées. Les valeurs seraient ainsi ajustées pour l'année modélisée et comparées avec les données modélisées sur les autres années. Une observation supplémentaire peut se faire afin de vérifier que l'homogénéité des résultats obtenus pour certains événements est bien la conséquence du manque d'informations de certaines parties du bassin versant. De la même manière, poursuivre les recherches sur la connectivité hydrologique et adapter le modèle aux conditions des sols découleraient sur une meilleure compréhension des facteurs remarquables dans le transport des sédiments et permettraient de prendre en compte ces informations dans les conseils apportés aux agriculteurs. Une première démarche consisterait à effectuer une nouvelle modélisation sur le sous-bassin versant ayant fait l'objet d'une analyse sur base de la pondération par le facteur cultural. Cela compléterait l'analyse de l'interaction entre la production et le transport de sédiments.

Effectuer des analyses similaires sur base de données d'années antérieures donnerait une meilleure vue de l'évolution de la situation du bassin versant. Le but serait de déterminer si les éventuels changements dans les rotations et les limitations des parcellaires agricoles précédents ont eu une influence sur la quantité de sédiments perdue au sein du bassin versant.

Une vérification des valeurs chiffrées obtenues par le modèle WATERSED peut être réalisée grâce à des mesures de terrains dans lesquels la hauteur de sédiments est déterminée dans les lits des cours d'eau. Ces mesures seront utilisées avec le dimensionnement du lit en ce point de mesures et pourront être combinées avec la valeur de rendement en sédiments modélisée au pixel correspondant. L'utilisation de l'ensemble de ces informations déterminera une densité apparente des sédiments qui, si celle-ci est proche de 1,5 g/l, correspondra à une valeur cohérente pour ce type de particules.

Du point de l'inventaire de terrain, un suivi détaillé des communes pourrait être intéressant afin d'avoir dans les années futures, des informations plus précises sur les différents événements (date, localisation, importance de l'événement,...). Un rassemblement des informations pourrait se faire au sein du comité local par exemple.

En regard de la relative homogénéité du bassin versant et de l'importance des zones problématiques au sein des affluents et de la Mehaigne, modéliser sur un sous-bassin versant tel que celui de la Soëlhe permettrait de réaliser des essais et de tester l'impact de différentes pratiques culturales telles que la pause de bandes enherbées ou le passage au labour suivant les courbes de niveau. Ces modélisations pourraient aussi servir à tester l'effet théorique de changement plus conséquent dans l'occupation du sol tel que les aménagements fonciers ruraux. Cela peut constituer un argument important à exposer aux agriculteurs. Ces différentes pratiques devront bien sûr se faire sur base de la bonne volonté des agriculteurs présents au sein de ce sous-bassin versant. Ces modélisations pourront également être combinées avec des mesures de terrains, plus aisées à cette échelle que sur l'entièreté du bassin versant pour un meilleur ajustement des données. Ces essais pourraient être une première étape pour des conseils aux agriculteurs dans le reste du bassin versant.

7. Conclusions

L'objectif de ce mémoire était de trouver les zones apportant le plus de particules à la Mehaigne et à ses affluents afin de prendre les mesures les plus appropriées. À la suite des modélisations, il n'y a que peu de zones apportant de grandes quantités de sédiments à l'exutoire. Le colmatage est présent sur une large majorité des cours d'eau, des conseils sur les pratiques agricoles seront donc plus appropriés que le placement de dispositifs de rétention telles que les fascines, bien que ceux-ci soient nécessaires ponctuellement. La quantification des pertes en sol reste une thématique difficilement quantifiable. Le manque d'information disponible ainsi que la complexité des phénomènes en sont les causes majeures. Sur base de ce mémoire, l'importance de poursuivre la recherche peut être observée dans les domaines relatifs à la physico-chimie des sols, à l'agriculture et à la préservation de l'environnement au sens large. De plus, la majorité des pluies utilisées dans le cadre des modélisations entreprises actuellement, sont des pluies de projets ou des événements particuliers qui se sont produits sur le bassin versant. Néanmoins, le modèle Watersed apporte une avancée et définit une approche à l'échelle du bassin versant et non plus à celle de la parcelle agricole. L'impact des différents types de parcelles et l'effet de leur emplacement peuvent être analysés afin d'apporter le plus de conseils possibles aux agriculteurs dans les zones problématiques. Les perspectives sont nombreuses et promettent beaucoup de recherche dans les années à venir.

8. Bibliographie

a. Référence internet

<https://bestat.economie.fgov.be/bestat/crosstable.xhtml?view=c85d8545-ce8a-444b-908d-9fb278d672ea>, consulté le 14/03/2017

<http://biodiversite.wallonie.be/fr/natura-2000.html?IDC=829>, consulté le 15/02/2017

<http://www.crvesdre.be/la-vesdre/decouvrir-bassin-de-vesdre/masses-d-eau>, Consulté le 23/06/2017

<http://geoportail.wallonie.be/catalogue/38c2a87e-d38a-4359-9899-9d4a6b9f0c2a.html>, consulté le 28/05/2017

<https://www.meteo.be/meteo/view/fr/357714-Generalites.html>, consulté le 02/05/2017

<http://www.meuseaval.be/index.php/bassins-versants/mehaigne>, consulté le 17/02/2017

https://www.pameseb.be/meteo_intro/reseau_pameseb.html, consulté le 10/02/2017

<http://www.wateringue.be/fr/>, consulté le 02/08/2017

<http://www.pays-burdinale-mehaigne.be/>, consulté le 02/08/2017

<https://www.natagriwal.be/fr/mesures-agro-environnementales/liste-des-mae/fiches>, consulté le 02/08/2017

http://www.statistiques.developpementdurable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/L_essentiel_sur/Environnement/Sol_et_sous-sol/Pertes_en_sol/carte_sol_pertes2b.pdf, consulté le 13/08/2017

b. Référence Bibliographique

Boardman, J., Poesen, J. (Eds.). (2007) *Soil erosion in Europe*. John Wiley & Sons.

Borselli, L., Cassi, P., Torri, D. (2008) Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3), 268-277.

Bernard, S. (2017) conférence, *Inasep*

Blum, W. E., de Baerdemaeker, J., Finkl, C. W., Horn, R., Pachepsky, Y., Shein, E. V., Grundas, S. et al. (2011). *Encyclopedia of agrophysics*. Springer Science & Business Media.

Brahic, Y., Thirion, M., Robinet, F., Rulkin, M., Lambotte, D., (2016) *Élaboration d'une méthodologie d'évaluation des incidences sur l'environnement de l'aménagement foncier s'appuyant sur la notion de services écosystémiques*, DGO3, Service publique de Wallonie

Cantreuil, V. (2014) *Analyse combinée de l'hydrologie et des pertes en sol dans les têtes de bassin versant agricole – mesure et modélisation dans le bassin d'Hevillers (Chastre)*. Mémoire de fin d'étude en bio-ingénierie orientation science et technologie de l'environnement. Gembloux (Belgique) : Gembloux Agro-Bio Tech ; Université de Liège.

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., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., Le Bissonnais, Y. (2002) Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena*, 46(2), 189-205.

Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F.J.P.M., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Roussema, S., Muxart, T. Roxo, M.J., Dostal, T. (2010) Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data. *Geomorphology*, 122(1), 167-177.

Ciampalini, R., Follain, S., Le Bissonnais, Y. (2012) LandSoil: a model for analysing the impact of erosion on agricultural landscape evolution. *Geomorphology*, 175, 25-37.

Civino, J. (2016) *Recensement de la Mulette Epaisse (Unio crassus) sur la Burdinale et la Soëlhe et analyse du colmatage dans la Meuhaigne*. Rapport de stage. Liège (Belgique) : Haute école de la Province de Liège

Colard, F., Cordonnier, H., Feltz, N., Maignard, A., Biielders, C., Degre, A. (2011). Convention de recherche d'intérêt générale Gestion Intégrée Sol Erosion Ruissellement-Rapport final. SPW.

Corradini, C., Morbidelli, R., & Melone, F. (1998) On the interaction between infiltration and Hortonian runoff. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 52-67.

Dardenne, J. (2007) *Approche de la lutte contre l'érosion des sols à l'échelle de points sensibles du bassin versant de la Meuhaigne*. Mémoire de fin d'étude en ingénierie industrielle orientation agronomie et environnement. Huy (Belgique) : Institut supérieur industriel Huy-Gembloux.

Dogot, T., Grégoire, M., Xanthoulis, D., Debauche O. (2014) Appui à la gestion des risques d'inondation par ruissèlement en zones rurales. Analyse coûts-avantages et aide à la décision : rapport final. Document Gembloux Agro-Bio Tech, Epuvaleur, Gembloux.

Evrard, O. (2008a) *Muddy floods in the Belgian loess belt: problems and solutions*. PhD thesis. Louvain (Belgium): UCL.

Evrard, O., Vandaele, K., Biielders, C., Wesemael, B. V. (2008b) Seasonal evolution of runoff generation on agricultural land in the Belgian loess belt and implications for muddy flood triggering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(8), 1285-1301.

Evrard, O., Nord, G., Cerdan, O., Souchère, V., Le Bissonnais, Y., Bonté, P. (2010) Modelling the impact of land use change and rainfall seasonality on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt. *Agriculture, ecosystems & environment*, 138(1), 83-94.

- Fiedler, F. R. (2003) Simple, practical method for determining station weights using Thiessen polygons and isohyetal maps. *Journal of Hydrologic engineering*, 8(4), 219-221.
- Fox, D. (2008) La dégradation des sols dans le monde. [online]. Available from: <http://unt.unice.fr/uoh/degisol/> [consulté le 12/02/ 2014].
- Hundecha, Y., & Bárdossy, A. (2004) Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of hydrology*, 292(1), 281-295.
- Kuhn, N. J. (2007) Erodibility of soil and organic matter: independence of organic matter resistance to interrill erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5), 794-802.
- Landemaine, V. (2016) *Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle*. Thèse de doctorat, Rouen (France) : Normandie université.
- Landemaine, V. (2017), Communication personnelle
- Legrain, X., Demarcin, P., Colinet, G., & Bock, L. (2011). Cartographie des sols en Belgique: aperçu historique et présentation des travaux actuels de valorisation et de révision de la Carte Numérique des Sols de Wallonie/Soil mapping in Belgium: historical overview and presentation of the current work on valorisation and revision of the Digital Soil Map of Wallonia. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 15, 647.
- Lindstrom, M.J. (2002) Tillage erosion, description and process of. *United States Departement of Agriculture-Agricultural Research Service (USDA-ARS), Morris, Minnesota, USA, 1776-1778*.
- Mamman, E., Ohu, J. O., Crowther, T. (2007) *Effect of soil compaction and organic matter on the early growth of maize (Zea mays) in a vertisol*. *International Agrophysics*, 21(4), 367.
- McCarthy, J. R., Pfof, D. L., Currence, H. D. (1993) Conservation tillage and residue management to reduce soil erosion. *University of Missouri Extension, available on line at <http://muextension.missouri.edu/xplor/agguides/agengin/g01650.htm>*.
- Mermut, A. R., Luk, S. H., Römkens, M. J. M., Poesen, J. W. A. (1997) Soil loss by splash and wash during rainfall from two loess soils. *Geoderma*, 75(3-4), 203-214.
- Moniteur belge (2012) annexe Xter à la partie réglementaire du Livre II du Code de l'Environnement, contenant le Code de l'Eau. Limites des classes d'état et de potentiel écologique
- Morgan, R. P. C. (2009) Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons.
- Poesen, J., Van Wesemael, B., Govers, G., Martinez-Fernandez, J., Desmet, P., Vandaele, K., Quine, T., Degraer, G. (1997). *Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion*. *Geomorphology*, 18(3-4), 183-197.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., Porter, J. P. (1991) RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of soil and Water Conservation*, 46(1), 30-33.

Réseau Wallon de développement rural (2011) *Érosion, coulées boueuses et inondations, Carnet de route n°1, SPW*

Service Public de Wallonie (2016). *Fiche de caractérisation de la masse d'eau MV03R Mehaigne I*. Direction Générale opérationnelle "Agriculture, Ressources naturelles & Environnement". Document réalisé par la Direction des Eaux de surface

Service Public de Wallonie (2016). *Fiche de caractérisation de la masse d'eau MV04R Burdinale*. Direction Générale opérationnelle "Agriculture, Ressources naturelles & Environnement". Document réalisé par la Direction des Eaux de surface

Service Public de Wallonie (2016). *Fiche de caractérisation de la masse d'eau MV05R Ruisseau de Forseilles*. Direction Générale opérationnelle "Agriculture, Ressources naturelles & Environnement". Document réalisé par la Direction des Eaux de surface

Service Public de Wallonie (2016). *Fiche de caractérisation de la masse d'eau MV06R Mehaigne II*. Direction Générale opérationnelle "Agriculture, Ressources naturelles & Environnement". Document réalisé par la Direction des Eaux de surface

Service Public de Wallonie (2016). *Fiche de caractérisation de la masse d'eau MV031R Mehaigne III*. Direction Générale opérationnelle "Agriculture, Ressources naturelles & Environnement". Document réalisé par la Direction des Eaux de surface

Service Public de Wallonie (1960). Rapport d'étude. Réalisé par Duchene

Service Public de Wallonie (2006). Rapport d'étude. Réalisé par Nicaise

Service Public de Wallonie (2013). Rapport d'étude. Réalisé par Lacasse

Service Public de Wallonie (2016). Rapport d'étude. Réalisé par Desimpel

Souchère, V., Cerdan, O., Ludwig, B., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Papy, F. (2003) Modelling ephemeral gully erosion in small cultivated catchments. *Catena*, 50(2), 489-505.

Souchère, V., Sorel, L., Couturier, A., Le Bissonnais, Y., Cerdan, O. (2007) Application du modèle STREAM à l'échelle d'un bassin versant au cours d'un cycle hydrologique. *Report of the French National Institute of Agricultural Research (INRA)*. http://www.prodinra.inra.fr/prodinra/pinra/data/2007/09/PROD2007afc2f2ca_862185746.

Valentin, C., Bresson, L. M. (1992) Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55(3-4), 225-245.

Vander Linden, S. (2017) Communication personnelle

Verheijen, F. G., Jones, R. J., Rickson, R. J., Smith, C. J. (2009) Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94(1), 23-38.

Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G., Salles, C. (2006) Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D22).

Wang, Y., Zhang, J. H., Zhang, Z. H., Jia, L. Z. (2016) Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape. *Science of The Total Environment*, 551, 522-532.

Whishmeier, W.H., Smith, D.D., (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation Planning. U.S. department of Agriculture. 537.

Zhang, J. H., Su, Z. A., Nie, X. J. (2009) An investigation of soil translocation and erosion by conservation hoeing tillage on steep lands using a magnetic tracer. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 177-183.

9. Annexes

a. Fonctionnement de WATERSED

L'ensemble des formules et des explications ci-dessous sont tirées de la thèse de Valentin Landemaine (2016).

- Module hydrologique
 - Balance hydrologique

Chaque événement pluvieux provoque une modification du statut hydrologique du sol qui peut être quantifié grâce à la balance hydrologique (HB_{r_i}) (mm) selon l'équation 1, dans laquelle R_i est la hauteur totale précipitée pour une cellule (mm), IR_i est la quantité de précipitations nécessaire pour atteindre la saturation (mm), IC_i est le taux d'infiltration en régime permanent (mm.h^{-1}) et t_{eff_i} est la durée de l'événement pluvieux (min). Une valeur positive sera synonyme d'un excès de pluie alors qu'une valeur négative indiquera un potentiel d'infiltration du ruissellement provenant de l'amont.

$$HB_{r_i} = R_i - IR_i - (\theta \cdot IC_i \cdot t_{eff_i}) \quad (1)$$

L'équation 1 est considérée comme stable pour des petits bassins versants dans lequel le temps de transport du flux jusqu'à l'exutoire est équivalent à la durée de la précipitation. Dans le cas de bassin versant de plus grande importance, il y a une sous-estimation de la quantité d'eau réinfiltrée. Pour contrer cela, le modèle WATERSED estime la durée de ruissellement pour chacune des cellules sur base du temps de transport et de la vitesse du flux au sein de chacune des parcelles.

- Vitesse du flux et temps de transport du flux

L'intensité moyenne d'excès de précipitation (e_i) (mm.h^{-1}) peut être dérivée de l'excédent de pluie, E_{R_i} (mm ou m^3) selon l'équation :

$$e_i = \frac{E_{R_i}}{t_{eff_i}} \quad (2)$$

Le temps de transport des flux de surface dans une cellule est estimé grâce aux formules de Manning. Sur base de cette méthode, la vitesse des flux de surface, V_{H_i} (m.s^{-1}) se détermine par l'équation 3, où S_i est la pente de la cellule (m.m^{-1}), Li est la longueur du flux de la cellule (longueur de la cellule ou flux nord-sud et est-ouest et correspond à $\sqrt{2}$ fois la taille de la cellule pour les flux obliques) et n_i est le coefficient de rugosité de Manning ($\text{s.m}^{-1/3}$).

$$V_{H_i} = \frac{S_i^{0.3} Li^{0.4} e_i^{0.4}}{n_i^{0.6}} \quad (3)$$

La vitesse de flux dans les chenaux V_{c_i} ($m.s^{-1}$) se détermine par association des équations de Manning et des équations de continuité en régime permanent pour un chenal « large » (éq. 4). Dans cette équation, Q_i est l'écoulement cumulé à travers la cellule (addition de tous les flux en amont et des quantités de précipitation) ($m^3.s^{-1}$) et W_i est la largeur du cours d'eau (m). Afin de prévenir des valeurs aberrantes, une valeur minimum et maximum de $0.02 m.s^{-1}$ et de $2 m.s^{-1}$ respectivement sont appliquées.

$$V_{c_i} = S_i^{0.3} \left(\frac{Q_i}{W_i} \right)^{0.4} n_i^{-0.6} \quad (4)$$

- Durée du ruissellement et itinéraire des flux.

Un hydrogramme unitaire triangulaire est appliqué afin de caractériser la durée du passage du flux au travers de la cellule. Pour cela, le décalage entre le moment auquel le centroïde de la pluie ($\frac{t_{eff_i}}{2}$) est atteint et celui où l'on atteint le pic de ruissellement (i.e. lag time, L_i (h)) est calculé, par cellule, par addition des temps de transports en amont de celles-ci et en les pondérant par la décharge cumulative (la pluie efficace est considérée comme distribuée uniformément dans le temps). Ces paramètres définissent le « time to peak », T_{p_i} (h) selon l'équation :

$$T_{p_i} = \frac{t_{eff_i}}{2} + L_i \quad (5)$$

La durée de ruissellement ou temps de concentration, T_{c_i} (h), est tirée du « time to peak » et d'un paramètre de récession α (-) selon l'équation 6. Ce paramètre α sert à réduire les erreurs de réinfiltration dues à la mauvaise estimation du temps de transport du flux et donc du temps de concentration.

$$T_{c_i} = T_{p_i} + \alpha \cdot T_{p_i} \quad (6)$$

Le modèle WATERSED tient compte de deux algorithmes de direction de flux : *Multiple Flow Direction* (MFD) and *Single Flow Direction* (SFD). Le choix de l'algorithme se fait grâce à la pente, où MFD sera utilisé si la pente du pixel est inférieure à 2% (dispersion du flux sur une surface plate) et SFD pour plus de 2% (flux concentrés).

Le pic de ruissellement Q_{p_i} ($m^3.s^{-1}$) se calcule sur base du temps de concentration et du volume total à travers la cellule, V_i (m^3) via l'équation :

$$Q_{p_i} = \frac{2V_i}{T_{c_i}} \quad (7)$$

- Module sédimentaire
 - Érosion en nappe et concentrée :

Le modèle prend en compte la topographie, les caractéristiques de surface du sol ainsi que les caractéristiques de l'événement pluvieux comme paramètres déterminants de l'érosion concentrée et diffuse. Pour l'érosion diffuse, SE_{S_i} (kg), une table associe à chaque pixel une concentration potentielle en sédiment SC_i pour chaque combinaison de surface et d'intensité de précipitation (eq. 8), avec E_{R_i} , l'excès de précipitations (mm ou m³).

$$SE_{S_i} = E_{R_i} \cdot SC_i \quad (8)$$

L'érosion concentrée se produit quand le pic de décharge sur une cellule excède une valeur Q_{crit} (m³.s⁻¹). Une ravine est considérée comme rectangulaire et unique par cellule. L'aire de la section de celle-ci nécessite la largeur de la ravine, W_{G_i} (m) qui se détermine par une relation empirique (Nachtergaele et al., 2002) selon l'équation 9, et la vitesse du flux, V_{G_i} selon Govers (1992) (eq. 10)

$$W_{G_i} = 2.51 Q_{peak_i}^{0.412} \quad (9)$$

$$V_{G_i} = 3.52 Q_{peak_i}^{0.294} \quad (10)$$

De là, la profondeur de ravine se calcule selon l'équation :

$$H_{G_i} = \frac{Q_{peak_i}}{W_{G_i} V_{G_i}} \quad (11)$$

Grâce aux précédentes formules, l'aire de la section de la ravine peut être déterminée (eq. 12). Un seuil maximal de 0.25m² est fixé pour ôter les résultats qui ne correspondent pas à une réalité de terrain possible. Le volume de la ravine s'obtient grâce à la section et à la longueur de la cellule et est pondéré par un coefficient d'érodibilité du sol compris entre 0 et 1 pour définir l'affinité du sol pour l'érosion (eq. 13).

$$A_{G_i} = W_{G_i} \cdot H_{G_i} \quad (12)$$

$$VOL_{Hi} = A_{G_i} \cdot L_i \cdot EF_i \quad (13)$$

Finalement, l'érosion concentrée, SE_{G_i} (kg) sera calculée selon l'équation 14 avec ρ la densité apparente (kg.m⁻³). L'érosion brute sera alors définie comme la somme de l'érosion concentrée et diffuse (équation 15)

$$SE_{G_i} = Vol_{Hi} \cdot \rho \quad (14)$$

$$SE_i = SE_{s_i} + SE_{G_i} \quad (15)$$

- Rendement en sédiment et dépôts

La masse de sédiments qui quittent une cellule, SY_i se définit selon l'équation 16 où Y_α est la masse de sédiments venant de la cellule en amont (kg) et SE_i est l'érosion brute (kg)

$$SY_i = SY_\alpha + SE_i \quad (16)$$

Deux cas sont possibles pour avoir du dépôt : un premier cas est possible lorsque la cellule possède le potentiel d'infiltrer une partie ou tout le ruissellement qui vient de l'amont et la masse déposée dans ce cas est explicité à l'équation 17, avec I_i le volume d'eau infiltré (m^3) et \overline{SC}_i la concentration moyenne en sédiment dans le flux.

$$SD_i = I_i \cdot \overline{SC}_i \quad (17)$$

$$\overline{SC}_i = \frac{SY_\alpha}{Q_\alpha} \quad (18)$$

Le rendement en sédiment devient alors :

$$SY_i = SY_\alpha + SD_i \quad (19)$$

La seconde possibilité est lorsque la concentration en sédiment dans le flux, \overline{SC}_i dépasse la capacité de transport, SC_{TC_i} ($g.l^{-1}$). Le rendement s'écrit alors :

$$SY_i = Q_i \cdot SC_{TC_i} \quad (20)$$

Q_i (m^3) est le ruissellement qui quitte la cellule. La masse de sédiments trouve sur base de la relation :

$$SD_i = SY_\alpha - SY_i \quad (21)$$

Une évolution vis-à-vis du modèle STREAM a été faite du point de vue de la concentration en sédiment et de la capacité de transport SC_{TC_i} . Dans STREAM, le SC_{TC_i} est fixé à un seuil, en fonction de la topographie et du couvert végétal et donc, la capacité de transport sera la même pour une énergie de flux donnée. Dans WATERSED, la proposition est de pondérer la concentration en sédiment dans le flux (\overline{SC}_i) par un ratio entre la résistance hydraulique de la végétation, donné par le coefficient de rugosité de Manning, n_i et la submersion de la cellule exprimée par la profondeur moyenne, h_i (m) (eq. 22)

$$SC_{TC_i} = \overline{SC}_i \cdot \exp\left(-\beta \cdot \frac{n_i}{h_i}\right) \quad (22)$$

Dans l'équation 22, β est le coefficient d'ajustement à la capacité de transport (-). La profondeur moyenne, h_i (eq. 23) est calculée sur base du volume de ruissellement Q_i , de la durée du ruissellement T_c ainsi que l'aire contributrice A_i (m^2).

$$h_i = \frac{Q_i}{T_c \cdot A_i} \quad (23)$$

Lorsque le flux et les sédiments atteignent le cours d'eau, ils sont directement envoyés au point le plus bas en lien avec la rivière (i.e. exutoire). Ce modèle ne prédit pas l'érosion des berges ni les sédiments retenus au sein des différents chenaux.

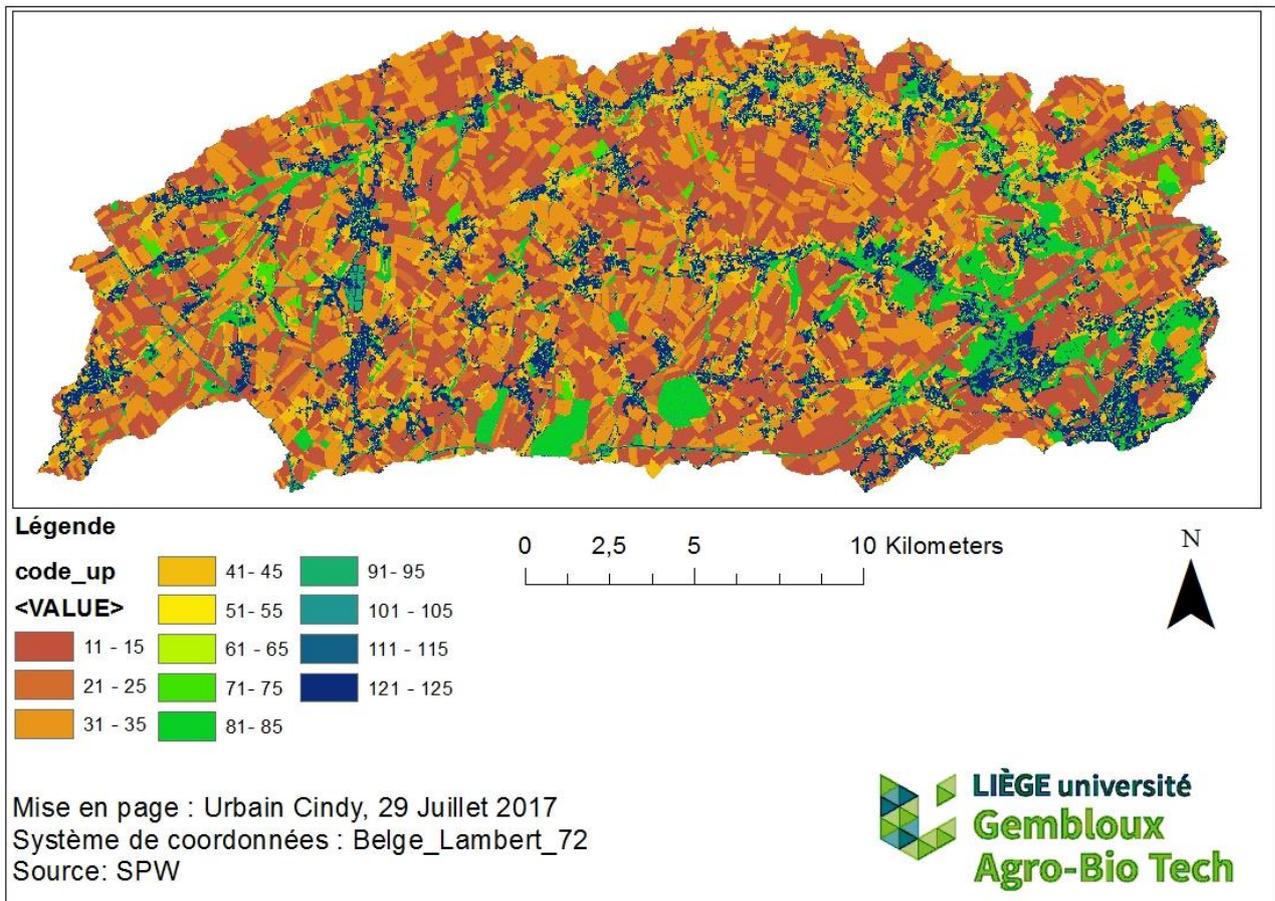
b. Liste des fichiers de sortie du modèle WATERSED

1. Excès de précipitation (m³)
2. Infiltration (m³)
3. Ruissellement de surface (m³)
4. Coefficient de ruissellement (%)
5. Time to peak (s)
6. Pic de ruissellement (m³/s)
7. Volume concentré (m³)
8. Érosion en nappe brute (kg)
9. Érosion concentrée brute (kg)
10. Dépôts et érosion nettes (kg)
11. Rendement en sédiment (kg)
12. Rendement en sédiment spécifique (kg)
13. Concentration de sédiment en suspension (g/l)
14. Concentration de sédiment en suspension (capacité de transport) (g/l)
15. Différence de hauteur (m)
16. Aire drainée (m²)
17. Vitesse (m/s)
18. Temps de transport (s)
19. Indice de Beven et Kirkby (-)
20. Capacité de stockage (m³)

c. Code de classification des principaux types de sols

Sols_25000	code_sol	définition
4010	1	Sols limoneux à drainage naturel favorable
4020	1	Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait
30000	1	Sols artificiels ou non cartographiés
4030	2	Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
6010	2	Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable
10000	2	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux
7210	3	Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel favorable
7220	3	Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel modéré à assez pauvre
7310	3	Sols limono-caillouteux à charge schisteuse et à drainage naturel principalement favorable
7410	3	Sols limono-caillouteux à charge psammitique ou schisto-psammitique et à drainage naturel principalement favorable
7510	3	Sols limono-caillouteux à charge calcaire ou contenant du calcaire et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
7610	3	Sols limono-caillouteux à charge de silicite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable
7810	3	Sols limono-caillouteux à charge crayeuse et à drainage naturel favorable
5010	4	Sols argileux à drainage naturel favorable à imparfait
5020	4	Sols argileux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
2010	5	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif
2020	5	Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
3010	5	Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement favorable
3020	5	Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait

d. Spatialisation du Code_up sur le bassin versant de la Meuse



e. Distance (m) entre les stations de mesure de débit et météorologique, valeurs des coefficients a et de Thiessen.

	Station de mesure de débit				
	Upigny	Hemptinne	Ambressin	Marneffe	Wanze
Alleur	46155.07	36849.67	32583.91	27556.41	25183.97
Couthuin	21382.58	14425.83	13834.28	5764.21	5110.64
Geer	24711.10	15593.82	10997.52	11094.65	14643.85
Leuze	3658.18	8590.03	13220.07	17862.29	22861.25
Roux-Miroir	16347.47	19461.75	20959.17	30112.04	36363.99
Coefficient a	2255.14	3045.23	3152.01	2570.03	2667.32
Coefficien thiessen	0.33	0.15	0.16	0.20	0.16

f. Données de précipitation entrées dans le modèle WATERSED

Événement	Début		fin		Nombre d'heure à plus de 2mm	Intensité totale (mm)	Intensité maximale pour 1 h (mm)	Intensité sur les 48h précédentes
	Date	Heure	Date	Heure				
1	12-11-10	15:00:00	14-11-10	19:00:00	7	44.26	6.33	9.98
2	28-06-11	19:00:00	29-06-11	12:00:00	8	28.56	6.43	0
3	22-08-11	23:00:00	23-08-11	13:00:00	2	23.71	16.78	1.63
4	04-01-12	19:00:00	07-01-12	13:00:00	1	25.23	3.44	5.57
5	05-07-12	19:00:00	06-07-12	02:00:00	3	26.87	11.19	0.14
6	07-05-13	16:00:00	09-05-13	07:00:00	3	20.83	7.08	0
7	25-08-14	15:00:00	27-08-14	01:00:00	8	55.4	12.81	1.57

g. Périodes de retour pour chaque événement sélectionné

Événement	Période de retour
1	Entre 15 et 20 ans
2	Entre 2 et 5 ans
3	Entre 2 et 5 ans
4	Entre 5 et 10 ans
5	Entre 2 et 5 ans
6	2 ans
7	Entre 30 et 40 ans

h. Attribution des différents code C-R-F pour chaque Code_up

Code_up	Etat de surface du sol- Hiver	Etat de surface du sol- Printemps	Etat de surface du sol- Été
11	C1-R0-F2	C3-R0-F2	C2-R0-F2
21	C2-R0-F2	C3-R1-F12	C3-R0-F2
31	C3-R0-F2	C1-R2-F0	C3-R0-F2
41	C3-R4-F11	C3-R4-F11	C3-R4-F11
51			
61			
71	C1-R0-F2	C1-R0-F2	C1-R0-F2
81	C3-R5-F0	C3-R5-F0	C3-R5-F0
91			
101			
111	/	/	/
121			
12	No Data	No Data	No Data
22	No Data	No Data	No Data
32	No Data	No Data	No Data
42	C3-R4-F11	C3-R4-F11	C3-R4-F11

52			
62			
72	C1-R0-F2	C1-R0-F2	C1-R0-F2
82	C3-R5-F0	C3-R5-F0	C3-R5-F0
92			
102			
112	/	/	/
122			
13	No Data	No Data	No Data
23	No Data	No Data	No Data
33	No Data	No Data	No Data
43	C3-R4-F11	C3-R4-F11	C3-R4-F11
53			
63			
73	C1-R0-F2	C1-R0-F2	C1-R0-F2
83	C3-R5-F0	C3-R5-F0	C3-R5-F0
93			
103			
113	/	/	/
123			
14	C1-F12-R1	C3-F2-R0	
24	C1-F1-R3	C2-F2-R1	
34	C1-F1-R3	C1-F0-R2	
44			
54			
64			
74			
84			
94			
104			
114	/	/	/
124			
15	C1-F0-R2	C3-F1-R2	/
25	C1-F0-R3	C2-F1-R2	/
35	C1-F0-R3	C1-F0-R2	/
45			
55			
65			
75			
85			
95			
105			
115	/	/	/
125			

i. Capacité d'infiltration pour chaque Code_up

Code_up	Capacité d'infiltration - Hiver	Capacité d'infiltration - Printemps	Capacité d'infiltration - Été
11	10	10	10
21	10	50	10
31	10	50	10
41	50	50	50
51	50	50	50
61	0	0	0
71	2	2	2
81	50	50	50
91	0	0	0
101	0.5	0.5	0.5
111	/	/	/
121	30	30	30
12	-99999	-99999	-99999
22	-99999	-99999	-99999
32	-99999	-99999	-99999
42	-99999	-99999	-99999
52	-99999	-99999	-99999
62	0	0	0
72	-99999	-99999	-99999
82	0.5	0.5	0.5
92	0	0	0
102	0.5	0.5	0.5
112	/	/	/
122	-99999	-99999	-99999
13	-99999	-99999	-99999
23	-99999	-99999	-99999
33	-99999	-99999	-99999
43	-99999	-99999	-99999
53	-99999	-99999	-99999
63	0	0	0
73	-99999	-99999	-99999
83	0.5	0.5	0.5
93	0	0	0
103	-99999	-99999	-99999
113	/	/	/
123	-99999	-99999	-99999
14	5	5	-99999
24	20	2	-99999
34	20	40	-99999
44	40	40	-99999
54	40	40	-99999

64	0	0	-99999
74	2	2	-99999
84	50	50	-99999
94	0	0	-99999
104	0.5	0.5	-99999
114	0.5	0.5	-99999
124	20	20	-99999
15	40	40	-99999
25	40	20	-99999
35	40	40	-99999
45	50	50	-99999
55	50	50	-99999
65	0	0	-99999
75	2	2	-99999
85	60	60	-99999
95	0	0	-99999
105	0.5	0.5	-99999
115	0.5	0.5	-99999
125	30	30	-99999

j. Concentration en sédiment pour chaque code_up en fonction de la saison et de l'intensité maximale des pluies

Code_up	Mes - Hiver / 0-10	Mes - Printemps / 0-10	Mes-Été / 0-10
11	2.5	0.5	0.5
21	0.5	0.5	0.5
31	0.5	0.5	0.5
41	7.5	7.5	7.5
51	0.5	0.5	0.5
61	0	0	0
71	2.5	2.5	2.5
81	2.5	2.5	2.5
91	0	0	0
101	0	0	0
111	/	/	/
121	0.5	0.5	0.5
12	-99999	-99999	-99999
22	-99999	-99999	-99999
32	-99999	-99999	-99999
42	-99999	-99999	-99999
52	-99999	-99999	-99999
62	0	0	0
72	-99999	-99999	-99999

82	0.5	0.5	0.5
92	0	0	0
102	0	0	0
112	/	/	/
122	-99999	-99999	-99999
13	-99999	-99999	-99999
23	-99999	-99999	-99999
33	-99999	-99999	-99999
43	-99999	-99999	-99999
53	-99999	-99999	-99999
63	0	0	0
73	-99999	-99999	-99999
83	0.5	0.5	0.5
93	0	0	0
103	-99999	-99999	-99999
113	/	/	/
123	-99999	-99999	-99999
14	0.5	0.5	-99999
24	7.5	7.5	-99999
34	7.5	7.5	-99999
44	0.5	0.5	0.5
54	0.5	0.5	0.5
64	0	0	0
74	12.5	12.5	12.5
84	0.5	0.5	0.5
94	0	0	0
104	0	0	0
114	0.5	0.5	-99999
124	0.5	0.5	0.5
15	0.5	0.5	-99999
25	0.5	0.5	-99999
35	0.5	0.5	-99999
45	0.5	0.5	0.5
55	0.5	0.5	0.5
65	0	0	0
75	7.5	7.5	7.5
85	0.5	0.5	0.5
95	0	0	0
105	0	0	0
115	0.5	0.5	-99999
125	0.5	0.5	0.5

Code_up	Mes - Hiver / 10-40	Mes - Printemps / 10-40	Mes-Été / 10-40
11	7.5	2.5	2.5
21	2.5	2.5	2.5
31	2.5	7.5	7.5
41	12.5	12.5	12.5
51	0.5	0.5	0.5
61	0	0	0
71	7.5	7.5	7.5
81	7.5	7.5	7.5
91	0	0	0
101	0	0	0
111	/	/	/
121	0.5	0.5	0.5
12	-99999	-99999	-99999
22	-99999	-99999	-99999
32	-99999	-99999	-99999
42	-99999	-99999	-99999
52	-99999	-99999	-99999
62	0	0	0
72	-99999	-99999	-99999
82	0.5	0.5	0.5
92	0	0	0
102	0	0	0
112	/	/	/
122	-99999	-99999	-99999
13	-99999	-99999	-99999
23	-99999	-99999	-99999
33	-99999	-99999	-99999
43	-99999	-99999	-99999
53	-99999	-99999	-99999
63	0	0	0
73	-99999	-99999	-99999
83	0.5	0.5	0.5
93	0	0	0
103	-99999	-99999	-99999
113	/	/	/
123	-99999	-99999	-99999
14	3.5	3.5	-99999
24	12.5	3.5	-99999
34	12.5	3.5	-99999
44	0.5	0.5	0.5
54	0.5	0.5	0.5
64	0	0	0

74	20	20	20
84	0.5	0.5	0.5
94	0	0	0
104	0	0	0
114	3.5	3.5	-99999
124	0.5	0.5	0.5
15	0.5	3.5	-99999
25	3.5	3.5	-99999
35	3.5	0.5	-99999
45	0.5	0.5	0.5
55	0.5	0.5	0.5
65	0	0	0
75	12.5	12.5	12.5
85	0.5	0.5	0.5
95	0	0	0
105	0	0	0
115	0.5	0.5	-99999
125	0.5	0.5	0.5

Code_up	Mes - Hiver > 40	Mes - Printemps >40	Mes-Été >40
11	12.5	7.5	7.5
21	7.5	7.5	7.5
31	7.5	12.5	7.5
41	30	30	30
51	0.5	0.5	0.5
61	0	0	0
71	12.5	12.5	12.5
81	7.5	0.5	0.5
91	0	0	0
101	0	0	0
111	/	/	/
121	0.5	0.5	0.5
12	-99999	-99999	-99999
22	-99999	-99999	-99999
32	-99999	-99999	-99999
42	-99999	-99999	-99999
52	-99999	-99999	-99999
62	0	0	0
72	-99999	-99999	-99999
82	0.5	0.5	0.5
92	0	0	0
102	0	0	0

112	/	/	/
122	-99999	-99999	-99999
13	-99999	-99999	-99999
23	-99999	-99999	-99999
33	-99999	-99999	-99999
43	-99999	-99999	-99999
53	-99999	-99999	-99999
63	0	0	0
73	-99999	-99999	-99999
83	0.5	0.5	0.5
93	0	0	0
103	-99999	-99999	-99999
113	/	/	/
123	-99999	-99999	-99999
14	7.5	7.5	-99999
24	30	7.5	-99999
34	30	7.5	-99999
44	0.5	0.5	0.5
54	0.5	0.5	0.5
64	0	0	0
74	30	30	30
84	0.5	0.5	0.5
94	0	0	0
104	0	0	0
114	7.5	7.5	-99999
124	0.5	0.5	0.5
15	3.5	7.5	-99999
25	7.5	7.5	-99999
35	7.5	3.5	-99999
45	0.5	0.5	0.5
55	0.5	0.5	0.5
65	0	0	0
75	20	20	20
85	0.5	0.5	0.5
95	0	0	0
105	0	0	0
115	3.5	3.5	3.5
125	0.5	0.5	0.5

k. Valeur des coefficients d'imbibition en fonction de la capacité d'infiltration et du cumul des pluies sur les 48h précédentes

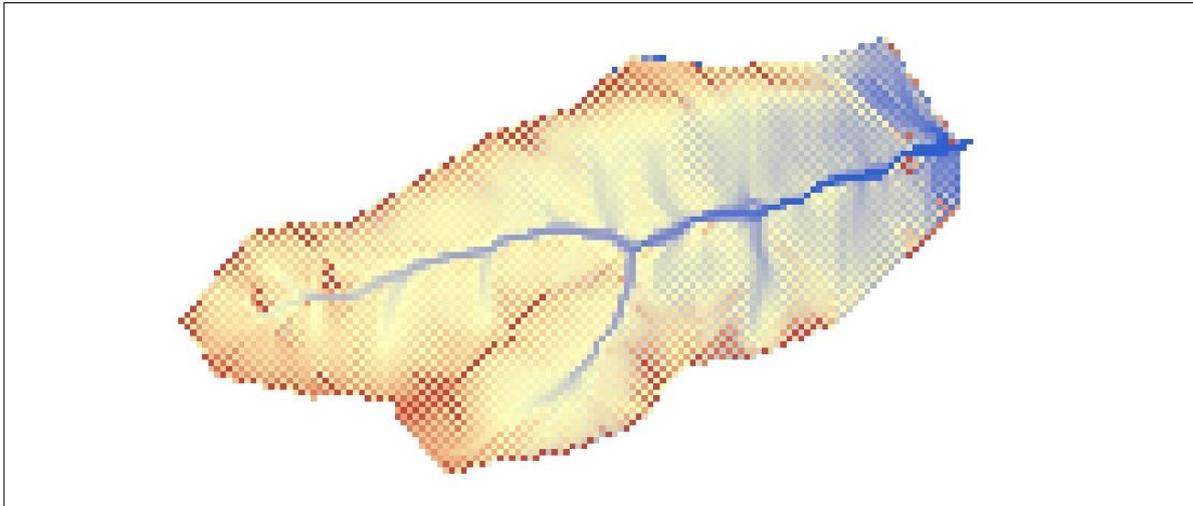
Capa_inf	Ant_0_H	Ant_1_H	Ant_16_H	Ant_40_H
0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	5	2	1	0
5	8	5	3	1
10	12	8	5	3
15	14	10	7	4
20	15	12	8	5
30	17	13	10	6
40	19	14	11	7
50	20	15	12	8
60	21	16	13	9

l. Valeur des coefficients de Manning par saison pour chacun des codes_up

Code_up	Manning - Hiver	Manning-Printemps	Manning - Été
11	0.043	0.151	0.1
21	0.056	0.099	0.04
31	0.056	0.047	0.05
41	0.3	0.3	0.3
51	0.15	0.15	0.15
61	0.012	0.012	0.012
71	0.015	0.015	0.015
81	0.15	0.15	0.15
91	0.04	0.04	0.04
101	0.015	0.015	0.015
111	0.02	0.02	0.02
121	0.15	0.15	0.15
12	0.043	0.151	0.1
22	0.056	0.099	0.04
32	0.056	0.047	0.05
42	0.3	0.3	0.3
52	0.15	0.15	0.15
62	0.012	0.012	0.012
72	0.015	0.015	0.015
82	0.15	0.15	0.15
92	0.04	0.04	0.04
102	0.015	0.015	0.015
112	0.02	0.02	0.02
122	0.15	0.15	0.15

13	0.043	0.151	0.1
23	0.056	0.099	0.04
33	0.056	0.047	0.05
43	0.3	0.3	0.3
53	0.15	0.15	0.15
63	0.012	0.012	0.012
73	0.015	0.015	0.015
83	0.15	0.15	0.15
93	0.04	0.04	0.04
103	0.015	0.015	0.015
113	0.02	0.02	0.02
123	0.15	0.15	0.15
14	0.043	0.151	0.1
24	0.056	0.099	0.04
34	0.056	0.047	0.05
44	0.3	0.3	0.3
54	0.15	0.15	0.15
64	0.012	0.012	0.012
74	0.015	0.015	0.015
84	0.15	0.15	0.15
94	0.04	0.04	0.04
104	0.015	0.015	0.015
114	0.02	0.02	0.02
124	0.15	0.15	0.15
15	0.047	0.159	0.1
25	0.056	0.103	0.04
35	0.056	0.047	0.05
45	0.3	0.3	0.3
55	0.15	0.15	0.15
65	0.012	0.012	0.012
75	0.015	0.015	0.015
85	0.15	0.15	0.15
95	0.04	0.04	0.04
105	0.015	0.015	0.015
115	0.02	0.02	0.02
125	0.15	0.15	0.15

m. Connectivité hydrologique pour les parcelles de 10, 100, 200 et 400m.



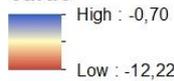
Légende

0 0,125 0,25 0,5 Kilometers



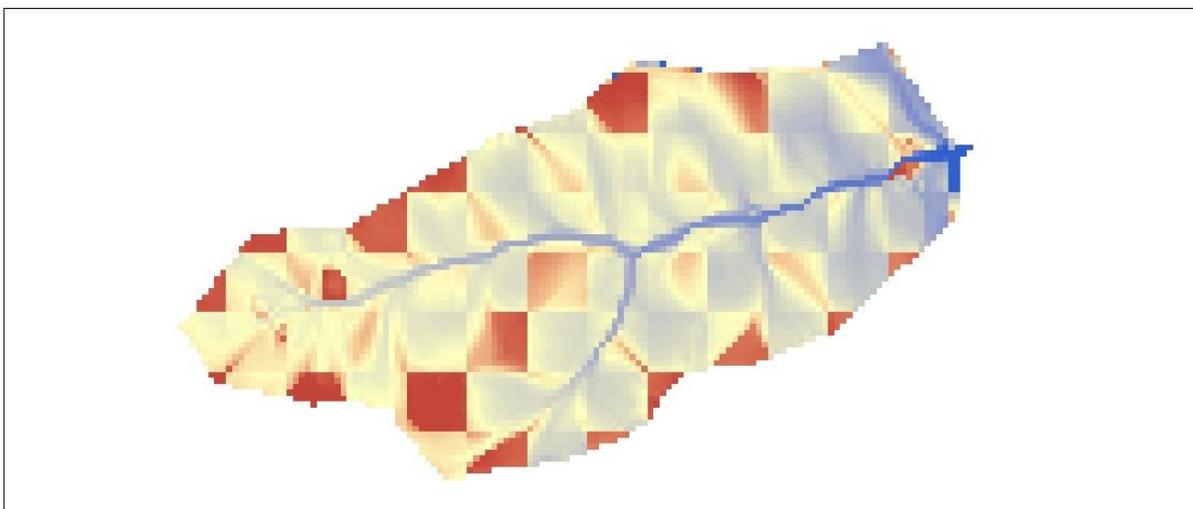
ic_10

Value



Indice de connectivité pondéré par le facteur cultural
parcelle de 10 m de largeur

Mise en page : Urbain Cindy, 07 août 2017
Système de coordonnées : Belge_Lambert_72



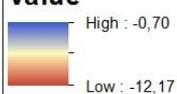
Légende

0 0,125 0,25 0,5 Kilometers



ic_100

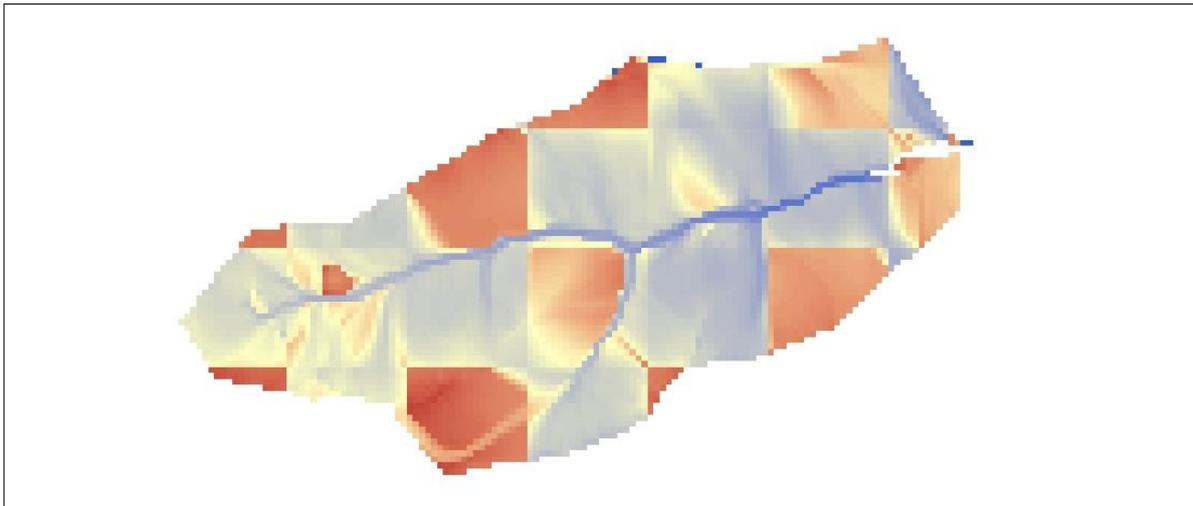
Value



Indice de connectivité pondéré par le facteur cultural
parcelle de 100 m de largeur

Mise en page : Urbain Cindy, 07 août 2017
Système de coordonnées : Belge_Lambert_72





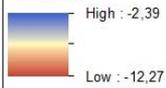
Légende

0 0,125 0,25 0,5 Kilometers



ic_200

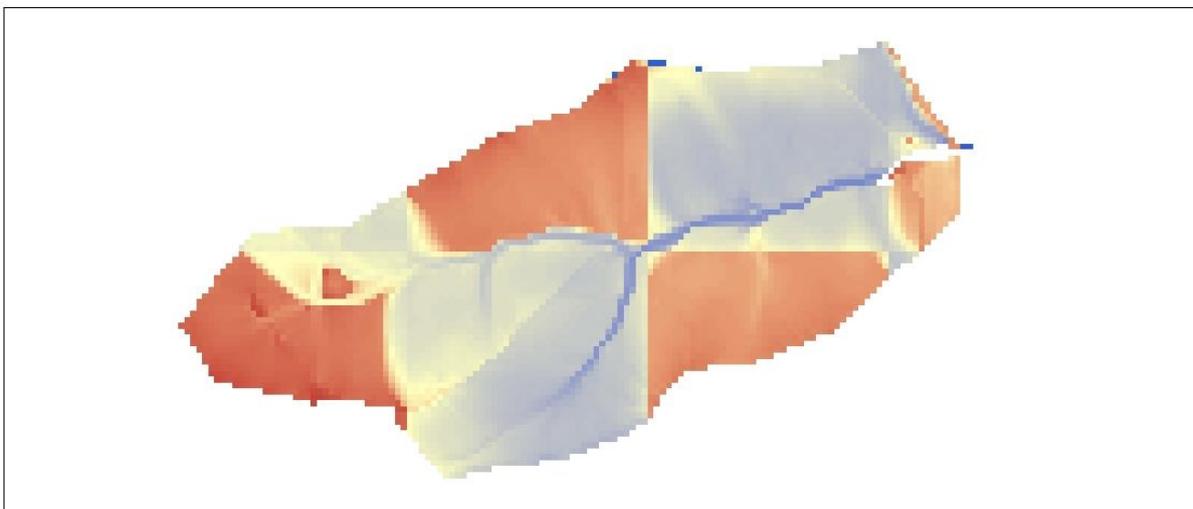
Value



Indice de connectivité pondéré par le facteur culturel
parcelle de 200 m de largeur



Mise en page : Urbain Cindy, 07 août 2017
Système de coordonnées : Belge_Lambert_72



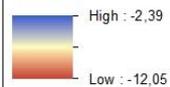
Légende

0 0,125 0,25 0,5 Kilometers



ic_400

Value

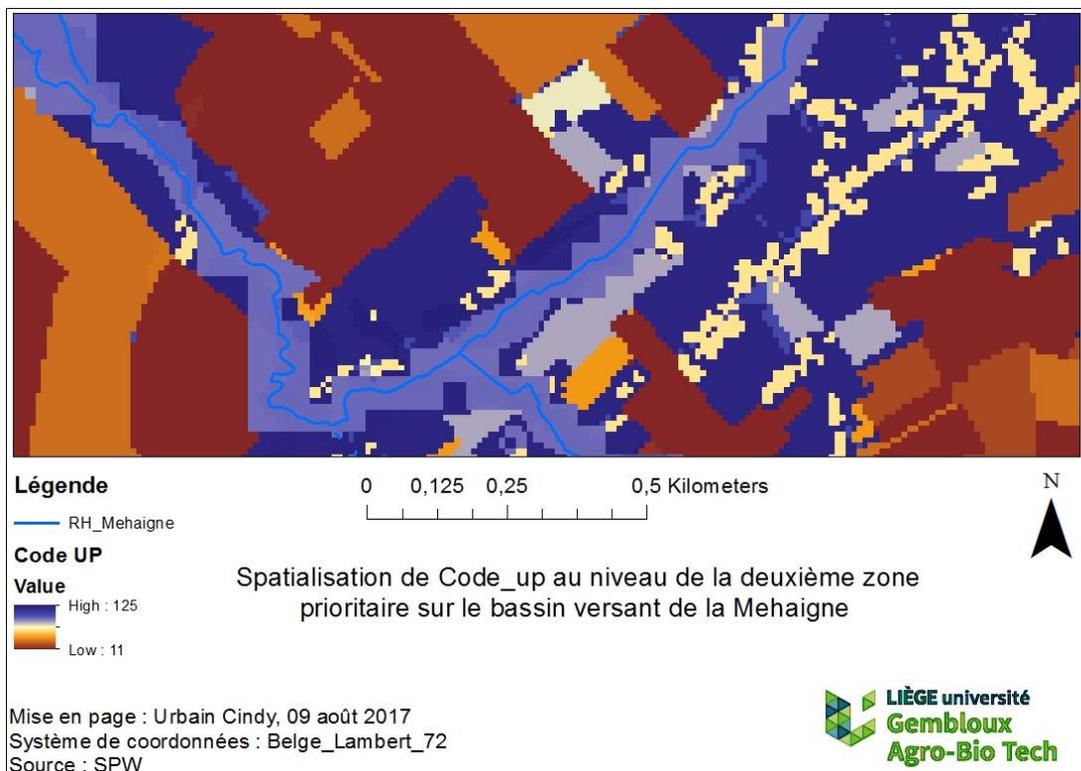
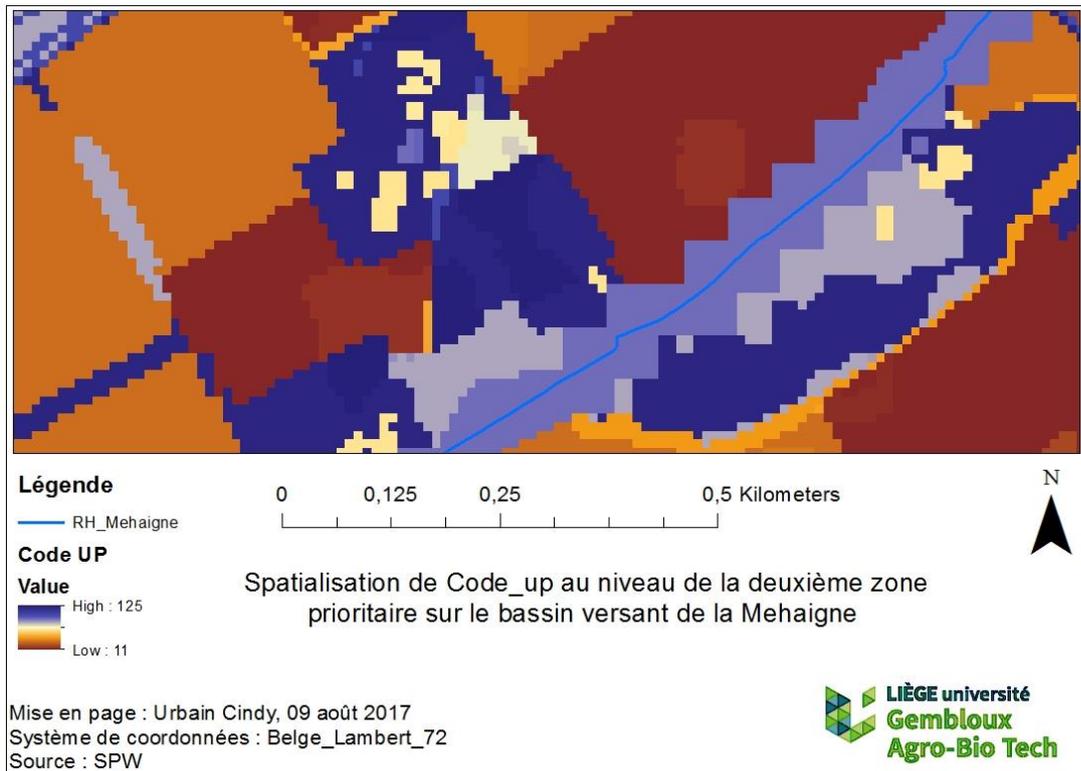


Indice de connectivité pondéré par le facteur culturel
parcelle de 400 m de largeur



Mise en page : Urbain Cindy, 07 août 2017
Système de coordonnées : Belge_Lambert_72

n. Spatialisation du CODE_UP pour les 3 zones prioritaires déterminées sur le bassin versant de la Mehaigne





Légende

— RH_Meuse

0 0,125 0,25 0,5 Kilometers

N



Code UP

Value

High : 125

Low : 11

Spatialisation de Code_up au niveau de la troisième zone
prioritaire sur le bassin versant de la Meuse

Mise en page : Urbain Cindy, 09 août 2017
Système de coordonnées : Belge_Lambert_72
Source : SPW

