

Etude du combiné de semis ERuiStop dans la lutte contre l'érosion en culture de maïs

Présenté par Jonathan Belis

Promoteur : Prof. Charles Bielders (UCL/ELI/ELIE)

Lecteurs : Prof. Sébastien Lambot (UCL/ELI/ELIE)
Ir. Gilles Manssens (CIPF)

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Je souhaiterais tout d'abord remercier mon promoteur M. Charles Bielders pour son encadrement et son suivi tout au long de ce mémoire. M. Bielders est resté patient et disponible tout au long de l'année, tout en étant professionnel mais aussi humain et compréhensif. J'aimerais ensuite remercier M. Gilles Manssens, pour m'avoir quelques fois encadré lors de mes visites et prises de mesures sur le terrain, mais également pour sa disponibilité durant l'année pour répondre à mes questions.

Je pense que je ne saurais pas assez remercier Jolan, pour son aide plus que précieuse et ses conseils pour tous les traitements informatiques. MATLAB, FORTRAN, PYTHON, ... semblent être une seconde langue pour lui.

Un merci particulier à Sébastien, pour avoir pris le temps de me faire un petit récapitulatif sur l'utilisation du Leica, et pour avoir géré le matériel de terrain de manière générale (notamment pour la résolution du mystère de la batterie de l'appareil photo). Merci également pour sa patience et sa bonne humeur, toutes les fois où je suis venu à son bureau à l'improviste...

Merci à Jean-Baptiste, également pour ses conseils et sa bonne humeur, notamment en hydrologie pour les analyses des pluies et la détermination des CN.

Merci à Axelle, pour le petit check de mon optimisation sous contrainte.

Merci à Lucas, Aurore, Tom, Alice, Hélène, Nathan et Charline, mes amis d'ENVI et co-mémorants, avec qui une belle cohésion s'est forgée durant toute l'année, et qui m'ont donné le sourire tout au long de l'accomplissement de ce travail.

Merci finalement à mes parents, pour leur soutien et la relecture de ce travail.

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	Etat de l'art.....	2
2.1.	Erosion des sols	2
2.1.1.	Définition et typologie	2
2.1.2.	Erosion hydrique en Belgique	3
2.2.	Conséquences de l'érosion hydrique.....	3
2.2.1.	Conséquences sur-site	4
2.2.2.	Conséquences hors-site	5
2.2.3.	Conséquences économiques	5
2.3.	Causes de l'érosion hydrique.....	6
2.3.1.	Erosivité de la pluie.....	6
2.3.2.	Erodibilité du sol.....	7
2.3.3.	Topographie	7
2.3.4.	Couverture du sol	7
2.4.	Techniques culturales anti-érosives	9
2.5.	Techniques culturales anti-érosives par modification du relief et du microrelief	10
2.5.1.	Microrelief et <i>depression storage</i>	10
2.5.2.	<i>Contour farming & contour tillage</i>	10
2.5.3.	<i>Tied ridging & furrow diking</i>	11
2.5.4.	<i>Zai & demi-lunes</i>	14
2.5.5.	<i>Contour bunds</i>	15
2.5.6.	<i>Terracing</i>	16
2.6.	Photogrammétrie rapprochée et génération de MNT pour la caractérisation du microrelief 17	
3.	Objectifs	19
4.	Matériel et méthodes.....	20
4.1.	Analyse des données du projet ERUISTOP	20
4.1.1.	Description du combiné de semis ERuiStop	20
4.1.2.	Sites étudiés	21
4.1.3.	Nature et acquisition des données	24
4.1.4.	Problématique liée aux données pluviométriques	26
4.1.5.	Probabilité d'observer du ruissellement : régression logistique.....	29
4.1.6.	Analyse des données du CIPF	29

4.1.7.	Estimation du <i>Curve Number</i> par optimisation sous contrainte	31
4.2.	Caractérisation du relief et détermination de la capacité de rétention des dépressions	33
4.2.1.	Photogrammétrie : fonctionnement du logiciel <i>Agisoft PhotoScan</i>	33
4.2.2.	Sites étudiés	33
4.2.3.	Acquisition des données et dispositif expérimental	34
4.2.4.	Modifications du MNT pour la simulation	36
4.2.5.	Algorithme de remplissage et connectivité hydrologique	39
4.2.6.	Estimation de l'erreur sur la photogrammétrie	43
5.	Résultats et discussion	44
5.1.	Analyses de la pluviométrie	44
5.1.1.	Pluviométrie et génération de la série temporelle d'Ottignies	44
5.1.2.	Probabilité d'observer du ruissellement	46
5.2.	Analyse de l'efficacité du combiné ERuiStop	48
5.2.1.	Ruissellement : Résultats	48
5.2.2.	Ruissellement : Discussion	56
5.2.3.	Erosion : Résultats	57
5.2.4.	Erosion : Discussion	62
5.3.	Estimation des Curve Numbers	63
5.3.1.	Estimation sur base des cumuls du CIPF	63
5.3.2.	Estimation sur base des pluies journalières de la PAMESEB	65
5.4.	Caractérisation des dépressions et détermination de la capacité de rétention	68
5.4.1.	Résultats : parcelle de Jurbise	68
5.4.2.	Analyse intra-parcellaire : parcelle de Marbaix	73
5.4.3.	Analyse inter-parcellaire	77
5.4.4.	Erreur sur la photogrammétrie	78
5.5.	Discussion générale des résultats	80
6.	Conclusions et perspectives	82
7.	Références bibliographiques	83
7.1.	Livres et articles scientifiques	83
7.2.	Documents et pages WEB	87
7.3.	Documents non publiés	89

Liste des figures

Figure 1: Exemple de calendrier des cultures pour l'année 2006, selon une enquête de l'AGRESTE (2010).	8
Figure 2: Organigramme présentant les méthodes mécaniques dans le contrôle de l'érosion hydrique (El-Swaify et al., 1982). Les méthodes spécifiques aux parcelles agricoles sont encadrées en rouge.	9
Figure 3: A gauche : schéma illustrant la distinction entre Ds et Sd (Antoine et al., 2012). A droite : schéma montrant les dépressions du sol et leur capacité de rétention et détention superficielle (Hairsine et al., 1992). L'eau commence par s'accumuler en (a), (b) et (c). L'eau peut s'accumuler en (a) et (c) pour finalement déborder et remplir (b). Du ruissellement ne sera observé que lorsque (d) sera complètement rempli.	10
Figure 4: A gauche : contour farming (source : NRCS Georgia USDA) ; à droite : strip till (source : NRCS USDA).	11
Figure 5: Furrow dikes (gauche) et Tripping paddle diker (droite) (Jones et Baumhardt, 2003). L'image de gauche montre la différence entre une parcelle témoin et une parcelle travaillée. On constate les effets érosifs ainsi que la perte en eau sur la parcelle lorsque le sol n'est pas travaillé.	12
Figure 6: A gauche : Tied ridges observés en culture de maïs, Tanzanie (Hudson, 1981). A droite : exemple de crêtes formées pour retenir l'eau dans des cultures sarclées (Shaxson, 2003). On remarque que les sommets des crêtes sont plus bas que les billons principaux de sorte que l'eau s'écoule entre les crêtes plutôt que se déverser entre les billons principaux.	13
Figure 7: A gauche: exemple de zaï observé au Niger (Shaxson, 2003). A droite: principe de la méthode du zaï et visualisation des poches d'humidité (d'après Roose et al., 1999).	14
Figure 8: Exemple de demi-lunes observées au Niger (Shaxson, 2003).	15
Figure 9: Schéma de contour bunds observés au Kenya (Critchley et al., 1991).	16
Figure 10: Exemple de terrasse (source : NRCS Georgia USDA).	17
Figure 11: A gauche : vue détaillée des barres constituant le rouleau antiérosif. A droite : vue détaillée des dépressions créées dans les interlignes (source : CIPF).	20
Figure 12: Combiné de semis ERuiStop du CIPF. De gauche à droite : semoir, rouleau antiérosif, rotative (source : CIPF).	21
Figure 13: Carte présentant les sites étudiés par le CIPF retenus pour l'analyse des données.	22
Figure 14: Dispositif expérimental de récolte d'eaux de ruissellement et de sédiments (source : CIPF).	25
Figure 15: Disposition des parcelles d'essais sur la parcelle expérimentale et dispositif de mesure (site d'Ottignies). On peut observer les bandes de plastique rigide délimitant les parcelles ainsi que les bacs de récolte (ici recouverts par une tôle) (source : CIPF).	25
Figure 16: Hyétoگرامme fictif permettant d'expliquer la méthodologie liée aux données de pluie. Les relevés déterminent la « période » du cumul pluviométrique. Les indices 0 et 1 désignent l'événement le plus intense de chaque cumul : 0 : l'événement le plus intense n'a pas provoqué de ruissellement ; 1 : l'événement le plus intense est « probablement » à l'origine du ruissellement (on ne peut affirmer que seul cet événement a généré le ruissellement).	27
Figure 17: Droite de corrélation entre les pluies périodiques du CIPF et les cumuls de la PAMESEB correspondants.	28
Figure 18: Parcelles de Jurbise (gauche) et Marbaix (droite).	34
Figure 19: MNT issu de l'essai de Jurbise ; généré par Agisoft PhotoScan. Les 7 points GPS (points verts) correspondent aux emplacements des 7 GCP.	35
Figure 20: Régression linéaire du MNT de Jurbise. Le plan correspond au gradient de pente.	36
Figure 21: Affichage du gradient de pente dans ArcMap.	37

Figure 22: Comparaison entre les MNT de Jurbise avec et sans gradient de pente.	37
Figure 23: Visualisation de la rotation et du découpage du MNT de Jurbise.....	38
Figure 24: MNT final de Jurbise, obtenu suite aux différentes manipulations MATLAB, et prêt à être utilisé pour les simulations.....	39
Figure 25: Organigramme des processus de l'algorithme de remplissage (Antoine et al., 2009).	40
Figure 26: Visualisation du fonctionnement de l'algorithme : calcul de la capacité de rétention.	41
Figure 27: Relative Surface Connection function (RSCf) et visualisation de la connectivité : la surface connectée à l'exutoire de la parcelle est représentée en rouge (Peñuela et al., 2016).....	42
Figure 28: Comparaison entre la pluviométrie cumulée sur la saison culturale (PAMESEB) et la pluviométrie cumulée recensée par le CIPF, par site, distinguant pluies ruisselantes et non ruisselantes. Le nombre sur chaque histogramme indique la valeur précise de pluviométrie associée aux pluies ruisselantes et non ruisselantes.	44
Figure 29: Série temporelle d'Ottignies - Pluies journalières (PAMESEB). Les nombres 5 à 9 représentent les mois de l'année.	45
Figure 30 : Série temporelle d'Ottignies - Intensités maximales journalières. Les nombres 5 à 9 représentent les mois de l'année.	46
Figure 31: Régression logistique servant à estimer la probabilité d'observer du ruissellement selon l'intensité horaire maximale (Ottignies – PAMESEB). Les losanges bleus représentent les données utilisées pour effectuer la régression (droite rouge).	46
Figure 32: Régression logistique servant à estimer la probabilité d'observer du ruissellement selon la pluie journalière observée (Ottignies - PAMESEB). Les losanges bleus représentent les données utilisées pour effectuer la régression (droite rouge).	47
Figure 33: Volumes de ruissellement et pluies associées – Ottignies, 5 années. Données du CIPF. Trois valeurs de ruissellement, correspondant aux trois répétitions, sont mesurées pour chaque cumul pluviométrique.....	48
Figure 34: Visualisation du ruissellement mesuré par le CIPF, en fonction des cumuls périodiques de la PAMESEB et de leur intensité.	49
Figure 35: Visualisation du ruissellement mesuré par le CIPF, en fonction des pluies journalières de la PAMESEB et de leur intensité.....	50
Figure 36: Ruissellement cumulé par saison et coefficients de ruissellement associés pour le site d'Ottignies, pour chaque année. En noir : CR pour pluies ruisselantes uniquement ; en orange : CR pour les pluies totales. Une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP.	51
Figure 37: Ruissellement moyen pour l'ensemble des années étudiées (Ottignies). Les barres d'erreur sont construites sur base des moyennes des 3 essais.	51
Figure 38: Volumes de ruissellement et pluies associées (Ittre). Données du CIPF. Trois valeurs de ruissellement, correspondant aux trois répétitions, sont mesurées pour chaque cumul pluviométrique.....	52
Figure 39: Ruissellement cumulé par saison et coefficients de ruissellement associés pour le site d'Ittre, pour chaque année. En noir : CR pour pluies ruisselantes uniquement ; en orange : CR pour les pluies totales. Une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP.	53
Figure 40: Ruissellement moyen pour l'ensemble des années étudiées (Ittre). Les barres d'erreur sont construites sur base des moyennes des 3 essais.....	53
Figure 41: Volumes de ruissellement et pluies associées (Virginal). Données du CIPF. Trois valeurs de ruissellement, correspondant aux trois répétitions, sont mesurées pour chaque cumul pluviométrique.....	54
Figure 42: Ruissellement moyen et coefficients associés (Virginal). Les barres d'erreur sont construites sur base de la moyenne des 3 essais.	54

Figure 43: Volumes de ruissellement et pluies associées (Hennuyères). Données du CIPF. Deux valeurs de ruissellement, correspondant aux deux répétitions de cet essai, sont mesurées pour chaque cumul pluviométrique.	55
Figure 44: Ruissellement moyen et coefficients associés (Hennuyères). Les barres d'erreur sont construites sur base de la moyenne des 3 essais.	55
Figure 45: Concentration en sédiments recueillis dans les volumes de ruissellement, toutes années confondues (Ottignies).....	57
Figure 46 : Pertes en terre observées pour chaque année ; une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP (Ottignies). NB : utilisation d'une échelle logarithmique pour mieux visualiser les pertes en terre. Le nombre indiqué représente la valeur précise calculée.	58
Figure 47: Concentration en sédiments recueillis dans les volumes de ruissellement, toutes années confondues (Ittre)	59
Figure 48: Pertes en terre observées pour chaque année (Ittre) ; une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP. NB : utilisation d'une échelle logarithmique pour mieux visualiser les pertes en terre. Le nombre indiqué représente la valeur précise calculée.	59
Figure 49: Concentration en sédiments recueillis dans les volumes de ruissellement, (Virginal).....	60
Figure 50: Pertes en terre observées pour chaque année (Ittre) ; une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP. NB : utilisation d'une échelle logarithmique pour mieux visualiser les pertes en terre. Le nombre indiqué représente la valeur précise calculée.	60
Figure 51: Concentration en sédiments recueillis dans les volumes de ruissellement (Hennuyères). .	61
Figure 52: Ruissellement théorique et CN calculés pour le site d'Hennuyères ; comparaison entre traitements Témoin et ERUISTOP.....	63
Figure 53: Ruissellement théorique et CN calculés pour le site de Virginal ; comparaison entre traitements Témoin et ERUISTOP.....	63
Figure 54: Ruissellement théorique et CN calculés pour le site d'Ottignies ; comparaison entre traitements Témoin et ERUISTOP.....	64
Figure 55: Ruissellement théorique et CN calculés pour le site d'Ittre ; comparaison entre traitements Témoin et ERUISTOP.	64
Figure 56: Ruissellement théorique et CN - Série temporelle d'Ottignies. Le CN est déterminé sur base des pluies journalières Pj (PAMESEB).	66
Figure 57: Ruissellement théorique et CN - Série temporelle d'Ottignies. Le CN est déterminé sur base des pluies journalières Pj (PAMESEB).	67
Figure 58: MNT représentatif de l'essai de Jurbise (pente de 0%).	68
Figure 59: Rétention maximale de l'eau dans les dépressions (MNT de Jurbise, pente de 0%).	69
Figure 60: Comparaison entre les MNT générés (haut) et les DSmax calculés (bas) pour les différentes pentes de l'essai de Jurbise. De gauche à droite, pentes de 0, 5, 10, 15 et 20%.	70
Figure 61: DSmax en fonction de la pente - essai de Jurbise.	70
Figure 62: Valeurs de pluies attendues pour observer 100% de ruissellement - Essai de Jurbise. P_runoff_tot = Pluie attendue avant d'observer 100% de ruissellement.	71
Figure 63: Fonctions de connectivité caractérisant l'essai de Jurbise.	72
Figure 64: Positionnement des 3 essais de Marbaix et visualisation des MNT bruts obtenus après modélisation dans Agisoft PhotoScan. Les points GPS correspondent aux emplacements des GCP utilisés pour le traitement dans Agisoft PhotoScan.	74
Figure 65: Capacité de rétention maximale des dépressions observée en moyenne sur le site de Marbaix. Les lignes verticales représentent l'écart-type.....	74
Figure 66: Comparaison de la capacité de rétention maximale entre une pente de 0% (gauche) et de 5% (droite), essai de Marbaix, répétition n°2.	75

Figure 67: Valeurs de pluies attendues pour observer 100% de ruissellement, en fonction de la pente. Les lignes verticales représentent l'écart-type. P_runoff_tot = Pluie attendue avant d'observer 100% de ruissellement.	76
Figure 68: Fonctions de connectivité selon la pente pour les trois répétitions de Marbaix.	76
Figure 69: Comparaison des DSmax selon la pente pour toutes les répétitions.	77
Figure 70: Comparaison entre les MNT de Jurbise (gauche) et Marbaix (droite), pente de 0%.	78
Figure 71: Vue détaillée des 3 objets sur le MNT issu du test relatif à l'estimation de l'erreur liée à la photogrammétrie. Les 3 objets volumineux sont entourés en rouge. Les GCP visibles sont entourés en bleu.	79

Liste des tableaux

Tableau 1: Pertes en terre annuelles en Belgique selon l'état du sol (d'après Morgan, 1995).	4
Tableau 2: Années et sites pour lesquels les données ont été récoltées. Les cadres rouges mettent en évidence les années pour lesquelles deux sites ont été analysés en parallèle.	21
Tableau 3: Caractère battant de l'horizon de surface selon l'indice de battance, selon la méthode de Baize et Darboux (2013).	23
Tableau 4: Résultats d'analyse granulométrique exprimés sur matière sèche décarbonatée (CPAR), effectuée pour les sites d'Ottignies et Ittre (2015) et Hennuyères (2012).	23
Tableau 5: Résultats d'analyses chimiques de caractérisation (CPAR) ; calcul du risque de battance R et de l'indice de battance IB ; type de sol selon la carte numérique des sols de Wallonie (CNSW – WalOnMap). Lhp = limon sableux fortement gleyifié sans développement de profil. LDa = limon sableux faiblement à modérément gleyifié à horizon B textural. Adp = limon modérément gleyifié sans développement de profil. Abp = limon non gleyifié sans développement de profil.	23
Tableau 6: Caractéristiques principales des sites étudiés. Le caractère battant est déduit selon la méthode proposée par Baize et Darboux (2013).	24
Tableau 7: Pluies disponibles par année et par site. En bleu foncé : pluies ruisselantes ; en hachuré : pluies ruisselantes et non ruisselantes.	27
Tableau 8: Comparaison entre les pluies cumulées du CIPF et les pluies cumulées dans les données de la PAMESEB. Les cumuls sont calculés sur base des données disponibles et mesurées par le CIPF. R : pluie ruisselante ; NR : pluie non ruisselante.	28
Tableau 9: Propriétés de l'appareil photo utilisé (Pentax K-30)	34
Tableau 10: Dimensions des différents objets utilisés pour l'estimation de l'erreur sur la photogrammétrie	43
Tableau 11: Réduction du ruissellement grâce à l'utilisation du rouleau antiérosif, par site	56
Tableau 12: Réduction des pertes en terre grâce à l'utilisation du rouleau antiérosif, par site.	62
Tableau 13: CN optimisés et indicateurs de qualité, sur base des essais et données du CIPF.	65
Tableau 14: CN optimisés et indicateurs de qualité.	66
Tableau 15: CN optimisés et indicateurs de qualité : 2nd essai.	67
Tableau 16: Caractéristiques physiques des 3 MNT de Marbaix	73
Tableau 17: Comparaison entre les hauteurs réelles (h) et hauteurs issues du MNT (h_MNT). La moyenne μ et l'écart-type σ^2 des h_MNT sont également fournis. Δh représente l'erreur liée à la modélisation.	79

Liste des abréviations

CN	<i>Curve Number</i>
CR	Coefficient de ruissellement
Ds	<i>Depression Storage</i>
DS _{max}	<i>Maximum Depression Storage</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
IB	Indice de battance
MNT	Modèle Numérique de Terrain
P_NR	Pluie non ruisselante
P_R	Pluie ruisselante
RDS	<i>Relative Depression Storage</i>
S _d	Détention superficielle
SR	Seuil de ruissellement

1. Introduction

L'érosion est un phénomène répandu à l'échelle du globe. D'origine naturelle, les processus érosifs se voient largement accentués par les activités anthropiques, dont notamment l'agriculture. De lourdes conséquences liées à l'érosion hydrique des sols cultivés, peuvent être observées, tant pour l'agriculteur que pour les citoyens. Citons par exemple une baisse de rendements liée aux pertes en terres pour l'agriculteur ou encore des coulées boueuses qui impactent les habitations en aval.

Cependant, en Belgique et plus particulièrement en Wallonie, l'agriculture occupe une place prépondérante, avec une SAU (Surface Agricole Utile) de 40% (SPW, 2017). Parmi cette superficie destinée à l'agriculture, on retrouve notamment le maïs, culture problématique d'un point de vue érosif. En effet, cette culture sarclée montre une faible couverture du sol et elle se développe à une période de l'année où les orages sont plus fréquents (CIPF, 2013). Le maïs montre les taux d'érosion hydrique les plus élevés en Belgique avec $14 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, après les sols nus ($23 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) et les vignobles ($20 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) (Boardman et Poesen, 2006). Cependant, avec plus de 50 000 hectares cultivés en 2016, le maïs fourrager occupait plus de 50% de la superficie agricole fourragère de la région wallonne pour une production de 2 405 240 tonnes (SPW, 2018). Une hausse de 629 ha an^{-1} en moyenne est observée, entre 1980 et 2015 (SPW, 2017). Malgré son caractère sensible, le maïs reste donc une culture très présente dans nos régions.

C'est dans ce contexte que le CIPF (Centre Indépendant de Promotion Fourragère) a mené un projet appelé « ERUISTOP », au cours duquel différentes techniques de travail du sol pour lutter contre l'érosion hydrique, spécifiquement en culture de maïs, ont été étudiées. Le projet, mené durant 5 ans (2012-2017), a abouti à la création d'un nouvel outil, le combiné de semis ERuiStop, qui crée dans le sol une série de dépressions capables de retenir les eaux de ruissellement. Le combiné de semis ERuiStop, ayant montré les résultats les plus favorables parmi l'ensemble des techniques analysées, constitue une nouvelle opportunité en termes de lutte contre l'érosion en culture de maïs. Ce mémoire va donc avoir pour but d'analyser l'efficacité du combiné de semis ERuiStop, en analysant d'une part les données récoltées au cours du projet, d'autre part en étudiant en détail les motifs créés par cet outil et leur capacité à retenir les eaux de ruissellement.

Ce mémoire s'articule autour de 4 parties principales. Tout d'abord, un état de l'art est présenté, permettant de mettre en contexte mais également de montrer les enjeux liés à l'érosion hydrique et les moyens de lutte qui existent de nos jours. L'ensemble des matériels et méthodes utilisés, ainsi que les démarches effectuées pour répondre aux objectifs sont ensuite présentés dans une seconde partie. La troisième partie concerne les résultats et leur analyse, ainsi que les discussions qui peuvent être apportées. Enfin, la dernière partie expose les conclusions de ce mémoire et les perspectives qui y sont liées.

2. Etat de l'art

2.1. Erosion des sols

2.1.1. Définition et typologie

L'érosion du sol est un processus d'altération de la surface du sol et de modification du relief, impliquant successivement le détachement de particules de sol et leur transport. (Morgan, 1995). Ces processus de détachement et de transport peuvent être opérés par divers facteurs qui vont alors différencier plusieurs types d'érosion. L'érosion hydrique est causée par l'eau, l'érosion éolienne par le vent et l'érosion aratoire par les outils de travail du sol. Il existe également d'autres formes d'érosion telles que le SLCH (« *Soil Loss due to Crop Harvesting* ») aussi appelé érosion par récolte : des mottes et fragments de terre adhèrent aux récoltes (betteraves, pommes de terre, carottes, ...), contribuant à la perte en terre. La gravité peut également provoquer de l'érosion, on observe alors des phénomènes tels que les glissements de terrain. On peut finalement citer l'érosion due au nivellement de terrain (Boardman et Poesen, 2006).

D'un point de vue terminologique, deux types d'érosion peuvent être observés : l'érosion dite naturelle ou géologique et l'érosion dite accélérée ou anthropique. La première constitue un processus « normal » d'altération. C'est l'érosion faisant partie des processus de formation naturelle du relief et des sols. Elle n'est donc pas influencée par des activités anthropiques et survient à de faibles taux dans les sols. La seconde, provoquée par des activités humaines, apparaît à des taux qui dépassent un seuil donné, et se voit généralement plus intense. La déforestation, le travail du sol intensif, la destruction de biomasse, etc. peuvent être à l'origine d'une telle forme d'érosion (Toy *et al.*, 2002 ; Blanco et Lal, 2010). Parmi les facteurs anthropiques, Darboux et Algayer (2013) mentionnent particulièrement le choix de la culture mise en place, pouvant éventuellement laisser le sol à nu en période pluvieuse.

Différentes formes d'érosion hydrique sont observées. Tout d'abord, l'érosion par rejaillissement (*splash erosion*) désigne l'impact des gouttes sur le sol. Celles-ci vont fragmenter les agrégats et projeter des sédiments sur plusieurs dizaines de centimètres (Darboux et Algayer, 2013). Ce phénomène est directement lié à l'énergie cinétique des gouttes. On peut ensuite distinguer l'érosion diffuse de l'érosion concentrée (Morgan, 1995). Le critère de cette distinction est l'énergie que possède la lame d'eau, mais également l'homogénéité spatiale des écoulements. On parle d'érosion diffuse (ou en nappe) lorsque la lame d'eau n'a pas suffisamment d'énergie pour détacher les particules de sol. Le détachement des particules est alors dû au *splash* et le transport se fait par ruissellement diffus. Lorsque l'énergie de la lame d'eau permet à celle-ci d'arracher des sédiments directement au sol, on parle d'érosion concentrée. On observe alors des dégradations du terrain telles que rigoles ou ravines (Darboux et Algayer, 2013). Une rigole est un chenal dont la section ne dépasse pas les 900 cm² ; au-delà de cette section, on parle de ravine (Poesen, 1993). Darboux et Algayer (2013) expliquent que ces deux formes d'érosion sont liées : le ruissellement diffus en amont alimente généralement le ruissellement concentré en aval.

Enfin, des écoulements souterrains peuvent également mener à une dernière forme d'érosion hydrique : l'érosion en galerie (*pipe erosion*) (Boardman et Poesen, 2006). On dispose encore actuellement de très peu d'informations concernant la formation de ces galeries souterraines peu profondes. En effet, la caractérisation de ces réseaux souterrains est complexe et peu de données ont été recensées à ce jour.

2.1.2. Erosion hydrique en Belgique

D'un point de vue érosif, la Belgique se voit attribuer 3 régions principales (Verstraeten *et al.*, 2006) et les processus d'érosion hydrique sont surtout présents dans les champs et cultures (Gillijns *et al.*, 2005). La région septentrionale est constituée de plaines et terrains plats, où les pentes sont négligeables. Les sols qu'on y trouve sont constitués d'argiles et de sables datant du Tertiaire, recouverts par des sables éoliens du Quaternaire. La topographie et les caractéristiques du sol font de cette région une zone moins favorable à l'érosion.

La Région centrale est un plateau de sédiments tertiaires couverts de dépôts de loess quaternaire. Ce plateau est découpé par les cours d'eau qui le traversent, accentuant plus ou moins fortement la topographie. Le loess, dépôt éolien limoneux, constitue un matériau extrêmement fertile et possède dès lors un potentiel agricole énorme. Ces terres sont donc dédiées principalement à l'agriculture.

Au sud se trouvent les Ardennes, constituées de Leptosols peu épais. On y trouve principalement des forêts et pâturages, et quasiment pas de cultures. En effet, on peut observer des pentes très pentues dépassant les 30% et les pluies sont également plus importantes, pouvant atteindre 1400 mm an⁻¹. L'érosion survient essentiellement sur les routes d'exploitation forestière, mais aucune donnée concernant ces régions n'existe.

L'érosion hydrique constitue la forme d'érosion la plus présente en Belgique centrale, à cause des dépôts loessiques, sensibles à l'érosion, la topographie vallonnée de la région et le mode d'exploitation des terres cultivées (Verstraeten *et al.*, 2006). Les recherches récentes liées à l'érosion en Belgique sont donc essentiellement centrées sur la ceinture loessique, où les pertes en terres sont les plus élevées (SPW, 2018).

2.2. Conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique a de nombreuses conséquences physiques, qu'elles soient sur-site ou hors-site (Boardman et Poesen, 2006). D'énormes coûts sont liés à l'érosion hydrique et sont également présentés dans cette section.

2.2.1. Conséquences sur-site

Les conséquences sur-site représentent l'ensemble des effets de l'érosion à l'échelle de la parcelle agricole. L'érosion peut premièrement mener à la perte partielle ou totale de la structure du sol, à cause de l'effet *splash* ou encore des dépôts de sédiments. Ces deux processus peuvent alors mener à la formation d'une croûte de battance ou à de la compaction en réduisant la porosité du sol (Darboux et Algayer, 2013). On peut dès lors observer une baisse de rendements dans les zones de dépôt de sédiments.

Une deuxième série de conséquences est liée aux pertes en terre. D'une part, ces pertes en terre signifient une perte en éléments nutritifs, indispensables au développement des cultures. On observe également une perte en matière organique qui permet notamment une meilleure cohésion du sol ou encore en engrais, répandus auparavant par l'agriculteur et permettant de combler les déficits nutritifs du sol. D'autre part, ces pertes en terre vont également contribuer à la réduction de la profondeur du sol, diminuant le volume de sol explorable par les racines ou encore la réserve en eau utile.

Aux Etats-Unis, 75 mm d'eau ainsi que 462 kg de nutriments sont perdus par hectare chaque année (Pimentel *et al.*, 1995). Concernant l'Europe, l'INRA (2014) indique que 12 % des sols européens, soit 115 millions d'hectares, sont soumis à de l'érosion hydrique. Alors qu'on estimait 25 millions d'hectares comme « gravement affectés » par l'érosion pour l'ensemble de la CEE (Communauté économique européenne) (De Ploey, 1990), Panagos *et al.* (2017) ont estimé que plus de 12 millions d'hectares de terres agricoles sont potentiellement sévèrement touchées par l'érosion hydrique chaque année en Union Européenne, sur base du modèle RUSLE.

En Belgique, les taux d'érosion peuvent fortement varier selon l'état du sol (Tab. 1).

Tableau 1: Pertes en terre annuelles en Belgique selon l'état du sol (d'après Morgan, 1995).

Nature du sol	Pertes en terre [$t\ ha^{-1}\ an^{-1}$]
Naturel	0.1 – 0.5
Cultivé	3 – 30
Nu	7 – 82

D'autres études ont montré tantôt une perte en terre annuelle de $223\ t\ ha^{-1}$, tantôt une perte en terre, cumulée sur 3 ans, de 8.1 et $12.3\ t\ ha^{-1}$ pour deux bassins versants en Flandre (Gillijns *et al.*, 2005). Pimentel *et al.* (1986) donnaient quant à eux des taux d'érosion de 10 à $25\ t\ ha^{-1}\ an^{-1}$ en régions limoneuses en Belgique centrale (lœss destiné à l'agriculture). Boardman et Poesen (2006) ont estimé, pour ces mêmes régions sur plusieurs années, des taux d'érosion variant entre 6.5 et $12.3\ t\ ha^{-1}\ an^{-1}$, alors qu'en prenant les années individuellement, les taux se voient plus variables, entre 0.3 et $25.5\ t\ ha^{-1}\ an^{-1}$. Ceci confirme les observations de Morgan (1995), selon lesquelles les processus érosifs sont très variables, spatialement mais aussi temporellement. Les estimations les plus récentes du SPW (2017) indiquent des pertes en terre moyennes en Wallonie de $2.5\ t\ ha^{-1}\ an^{-1}$ pour l'année 2015.

Troisièmement, l'érosion peut causer des dégâts aux cultures. Les graines ou même les racines de plantes peuvent être exposées et perdre contact avec leur substrat. Inversement, de petites plantes peuvent se voir partiellement ou entièrement recouvertes par les colluvions. Notons que des graines ou plantules peuvent aussi être arrachées par l'érosion hydrique.

L'érosion sur-site peut mener à une quatrième et dernière conséquence. Un potentiel ravinement qui en résulte peut empêcher ou entraver les déplacements des machines agricoles et les opérations de récolte (Verstraeten *et al.*, 2006).

2.2.2. Conséquences hors-site

Les conséquences hors-site représentent tous les impacts que vont avoir l'érosion et le ruissellement à une échelle qui n'est plus restreinte à la parcelle agricole, et qui se verra plus large. Les coulées boueuses sont une première conséquence importante de l'érosion hors-site. Dans des régions rurales où l'occupation du sol est dominée par des cultures, les inondations sont très souvent couplées aux coulées boueuses, résultant des pertes en terres agricoles. Ces boues peuvent alors faire subir de lourds dégâts aux infrastructures et habitations se situant en aval du bassin versant. Les ravines peuvent elles aussi impacter les infrastructures humaines, plus spécifiquement les routes et chemins non revêtus, pouvant gêner voire obstruer totalement la circulation au sein de ces voies de communication.

Les sédiments détachés par l'érosion hydrique peuvent circuler librement depuis les parcelles agricoles. Alors qu'ils peuvent dégrader les habitations sous formes de coulées boueuses, ils peuvent également être emportés jusque dans des masses d'eau ou ouvrages de retenue d'eau (SPW, 2017). On estime qu'environ 525 500 tonnes de sédiments secs sont apportés chaque année dans les masses d'eau en Wallonie (SPW, 2017). Ils sont alors capables d'engendrer plusieurs choses : dégradation de la qualité des eaux de surface par apport de polluants (pesticides ou métaux lourds provenant des champs) ; relargage de contaminants fixés aux sédiments dans les différentes masses d'eau ; sédimentation au fond des lits des masses d'eau telles que les rivières et les étangs et envasement des bassins d'orage et autres ouvrages de retenue d'eau. Notons particulièrement qu'un apport excessif en sédiments provenant de cultures et riches en nutriments tels que l'azote ou le phosphore peut conduire à une eutrophisation des cours d'eau (Verstraeten *et al.*, 2006). La biodiversité du cours d'eau est alors directement impactée par l'érosion hydrique.

2.2.3. Conséquences économiques

Toutes les conséquences citées ci-dessus (sur-site et hors-site) ont en commun qu'elles représentent un coût économique qui peut s'avérer non négligeable. En effet, si l'on s'intéresse de plus près aux conséquences sur-site de l'érosion, celles-ci provoquent directement ou indirectement une baisse des rendements si l'agriculteur ne prend pas de

mesures pour combler les pertes. L'agriculteur subit alors une perte économique, soit pour refertiliser ses terres, soit par une baisse de rendements.

Aux Etats-Unis, la totalité des coûts liés à l'érosion hydrique dépasse les 7 milliards de dollars chaque année (Pimentel *et al.* 1995). En 2010, pour 167287.3×10^3 ha de surfaces cultivées en Union européenne (Eurostat), 1257.22 millions d'euros sont perdus chaque année pour les agriculteurs, suite à une baisse de productivité due à l'érosion hydrique (Panagos *et al.*, 2017). Le maïs, 4^{ème} culture la plus importante en termes de superficie agricole (15700×10^3 ha) et de rendements annuels (111.586×10^3 t an⁻¹), voit une perte annuelle dépassant les 130 millions d'euros. Pour l'ensemble du territoire européen, une perte de productivité agricole de 0.43% par an est observée, à cause de l'érosion hydrique. Concernant la Belgique, pour $1\,405 \times 10^3$ ha de terres agricoles, on observe une perte de 1.38 millions d'euros chaque année pour l'agriculteur (Panagos *et al.*, 2017).

Concernant l'érosion hors-site, les différentes conséquences citées précédemment vont engendrer de multiples travaux : rénovation, nettoyage, entretien, etc. Toutes ces actions vont avoir des coûts considérables selon l'ampleur des dégâts. En Flandre, Verstraeten *et al.* (2006) donnent une estimation brute des coûts annuels minimum associés à l'érosion se situant entre 60 et 95 millions d'euros.

2.3. Causes de l'érosion hydrique

Différents facteurs sont à la source de l'érosion hydrique (Toy *et al.*, 2002 ; Morgan, 1995). Au vu des nombreux impacts de l'érosion hydrique, il y a lieu de s'intéresser à l'ensemble des facteurs qui y sont liés. Ces éléments n'agissent pas indépendamment et ce sont des combinaisons différentes de ceux-ci qui donnent lieu à des phénomènes érosifs plus ou moins conséquents.

2.3.1. Erosivité de la pluie

Les précipitations provoquent de l'érosion via les gouttes d'eau qui tombent sur le sol mais également par l'eau qui s'écoule sur la surface du sol (Toy *et al.*, 2002). L'érosivité de la pluie désigne alors la capacité des précipitations et du ruissellement à détacher les particules et les transporter en aval (Darboux et Algayer, 2013). Deux caractéristiques d'une pluie indiqueront son aptitude à provoquer de l'érosion : son intensité et l'énergie cinétique des gouttes qui la constituent (Morgan, 1995).

Au plus une pluie est intense, au plus celle-ci provoquera du ruissellement. L'intensité de la pluie est liée au diamètre moyen des gouttes : en moyenne, des gouttes de plus gros diamètre sont observées lorsque l'intensité de la pluie augmente (Hudson, 1981). Le diamètre des gouttes influence également l'énergie cinétique de la pluie en augmentant leur masse

(Morgan, 1995). Tandis que l'intensité de la pluie génère le ruissellement, l'énergie cinétique de la pluie contribue *in fine* au détachement des particules de sol.

2.3.2. Erodibilité du sol

L'érodabilité (ou érodibilité) désigne la sensibilité du sol face aux agents érosifs (Darboux et Algayer, 2013). Cette caractéristique du sol dépend de nombreux facteurs tels que la texture, la stabilité des agrégats, la résistance au cisaillement (*shear strength*), la capacité d'infiltration, et la teneur en composants organiques et chimiques (Morgan, 1995), qui peuvent être interdépendants. La résistance mécanique du sol représente la résistance du sol au détachement tandis que la capacité d'infiltration du sol influence directement le ruissellement en limitant la quantité d'eau en surface.

La résistance mécanique dépend de la stabilité structurale du sol. La texture ainsi que la cohésion du sol impactent la capacité du sol à résister à l'impact des gouttes et aux frottements des eaux de ruissellement.

La capacité d'infiltration dans un sol dépend principalement de sa conductivité hydraulique à saturation, dépendant elle-même directement de la porosité du sol (surtout la distribution de la taille des pores et la part de la macroporosité). Un sol présentant une macroporosité plus importante favorise ainsi l'infiltration. L'effet *splash* peut ainsi donner lieu à la formation d'une croûte de battance. Cette imperméabilisation de la surface du sol diminue la macroporosité du milieu, réduisant ainsi la capacité d'infiltration (Darboux et Algayer, 2013). La compaction d'un sol limite de la même manière l'infiltration. Sous l'effet de la pression de machines agricoles, la porosité (principalement la macroporosité) est réduite.

2.3.3. Topographie

La topographie constitue un autre élément affectant l'érosion. La pente et sa longueur impactent directement la vitesse d'écoulement et le volume d'eau ruisselé. Au plus un terrain sera pentu sur une longue distance, au plus l'érosion hydrique se verra importante (Morgan, 1995).

2.3.4. Couverture du sol

La couverture du sol a un impact majeur sur l'érosion hydrique. La nature du couvert (végétation naturelle, cultures et résidus ou encore *mulch* (paillage)) peut varier et avoir différentes conséquences sur l'érosion (Morgan, 1995). De fait, la couverture du sol va avoir trois effets : diminution du détachement par augmentation de la cohésion du sol, diminution du ruissellement et sa vitesse en créant une rugosité de surface (Toy *et al.*, 2002) et réduction

des croûtes de battance par interception de la pluie (Darboux et Algayer, 2013). Morgan (1995) résume le rôle de la végétation par ses effets superficiels et souterrains. En surface, l'énergie des gouttes et de l'eau de ruissellement est absorbée, tandis que le système racinaire augmente la force mécanique du sol sa surface.

Cultures de printemps

Les cultures dites « de printemps » sont des cultures présentant un risque érosif accru pour diverses raisons (Bielders *et al.* 2003). En effet, ces cultures sarclées sont semées assez tardivement dans la saison et exposées davantage aux orages, plus fréquents à cette période de l'année (SPW, 2017). Les cultures de printemps incluent principalement le maïs, la betterave, la pomme de terre, la chicorée ou encore le tournesol et sont dénommées ainsi car semées de mars à mai. Elles s'opposent aux cultures dites « d'hiver » comme le blé tendre et dur, l'orge ou le colza, semées en fin d'automne (Fig. 1) (AGRESTE, 2010).

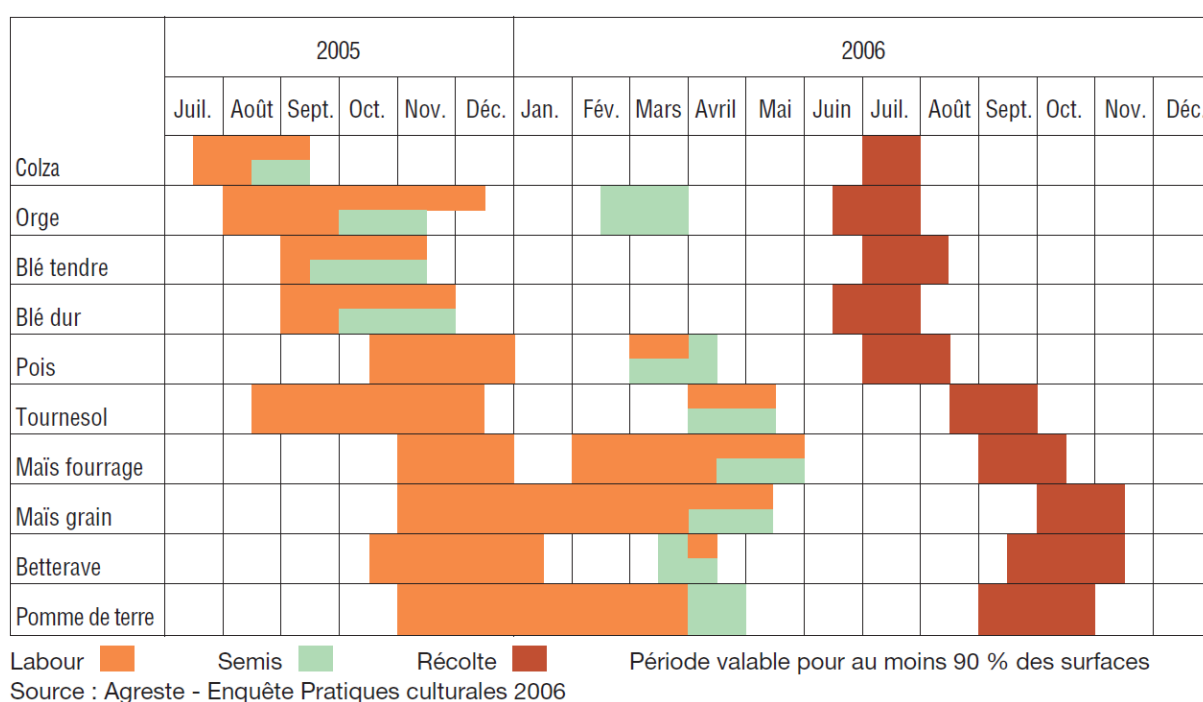


Figure 1: Exemple de calendrier des cultures pour l'année 2006, selon une enquête de l'AGRESTE (2010).

Ouvry (1987) explique que les risques de ruissellement sont les plus importants pour les cultures de printemps car les interlignes, nus et souvent tassés, occupent 50 à 80% de la surface agricole. Ces cultures sarclées telles que le maïs sont également souvent cultivées sur des terres accidentées à pente plus élevée (CIPF, 2013). Les tendances actuelles montrent pourtant que les cultures de printemps tendent à remplacer les cultures d'hiver dans les régions loessiques d'Europe de l'Ouest, pour des raisons de logique de marché. En Belgique, les pertes en terre restent les plus importantes dans la ceinture loessique et en région de grandes cultures (régions limoneuse, sablo-limoneuse et Condroz), où les cultures de printemps sont nombreuses (SPW, 2017).

2.4. Techniques culturales anti-érosives

Différentes techniques et méthodes sont utilisées et reconnues pour contrôler l'érosion ainsi que le ruissellement dans les parcelles agricoles. El-Swaify *et al.* (1982) résument les différentes stratégies de conservation du sol pour lutter contre l'érosion, qui se distinguent en deux catégories : les méthodes dites « végétales » et les méthodes dites « mécaniques ». Ces dernières sont synthétisées en un organigramme présenté à la figure 2.

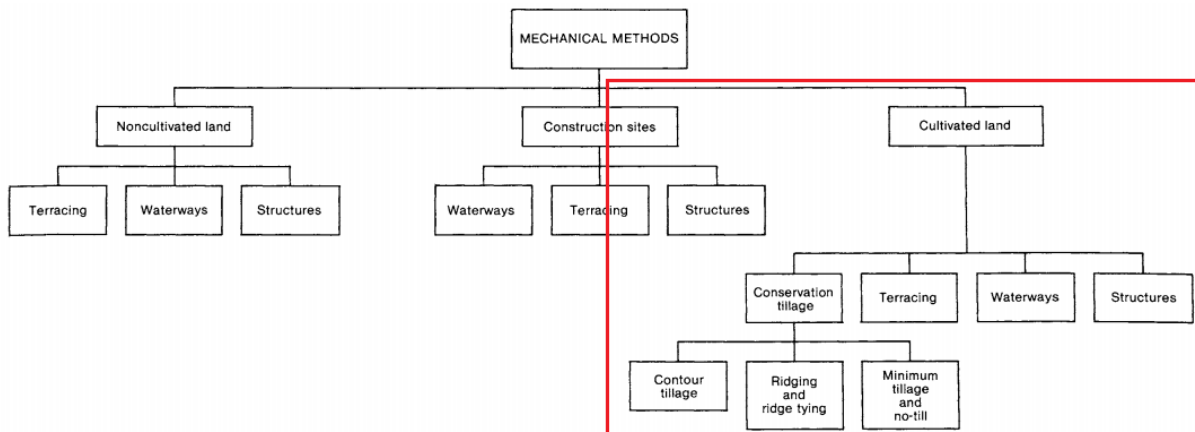


Figure 2: Organigramme présentant les méthodes mécaniques dans le contrôle de l'érosion hydrique (El-Swaify *et al.*, 1982). Les méthodes spécifiques aux parcelles agricoles sont encadrées en rouge.

Morgan (1995) distingue quant à lui trois catégories : les mesures agronomiques (considérées comme méthodes végétales selon El-Swaify *et al.*), la gestion du sol (incorporée dans les méthodes mécaniques d'El-Swaify *et al.*), et les méthodes mécaniques.

Morgan (1995) décrit les méthodes agronomiques comme des mesures de conservation du sol basées sur la couverture végétale et son effet réducteur en termes d'érosion (*cfr.* §2.3.4). La gestion du sol concerne le maintien de la fertilité et de la structure du sol, afin de limiter l'érodibilité du sol et de mieux lutter contre l'érosivité de la pluie (*cfr.* §2.3.1-2). Les méthodes mécaniques sont quant à elles décrites comme étant l'ensemble des techniques permettant de contrôler le mouvement de l'eau à la surface du sol. Dans ce cas, plusieurs objectifs sont visés et des techniques spécifiques permettent d'y répondre : réduire la vitesse du ruissellement, augmenter la capacité de stockage de surface ou encore gérer l'eau excessive.

On remarque donc que la classification des différentes méthodes varie d'un auteur à l'autre, les méthodes étant souvent liées entre elles et ayant les mêmes objectifs.

Unger *et al.* (2010) confirment l'utilisation du *conservation tillage* (*no tillage*, *contour tillage*, ou encore *strip tillage*) ou alors l'altération de la surface du sol (via *furrow diking* ou même le *terracing*) comme méthodes adéquates permettant d'empêcher le ruissellement ou de diminuer le taux de ruissellement, tout en laissant plus de temps à l'eau pour s'infiltrer.

2.5. Techniques culturales anti-érosives par modification du relief et du microrelief

2.5.1. Microrelief et *depression storage*

Le microrelief permet de stocker de l'eau à la surface du sol. Il limite le ruissellement et favorise l'infiltration (Moore et Larson, 1979), empêchant l'eau de couler, éroder ou transporter des sédiments. Le stockage de surface inclut deux concepts distincts : le *depression storage* D_s (ou *surface retention*) et le *surface detention* S_d . La capacité de rétention des dépressions D_s caractérise la hauteur d'eau stockée dans les fosses et dépressions du sol. La détention superficielle S_d caractérise quant à elle la hauteur d'eau en excès par rapport au D_s , causée par le ruissellement (Antoine *et al.*, 2012). Elle dépend de la rugosité, du travail du sol mais aussi du climat (Martin *et al.*, 1997). Les schémas présentés à la figure 3 illustrent d'une part ces deux concepts et permettent d'autre part de visualiser les dépressions du sol et leur rôle dans la détention superficielle et le ruissellement.

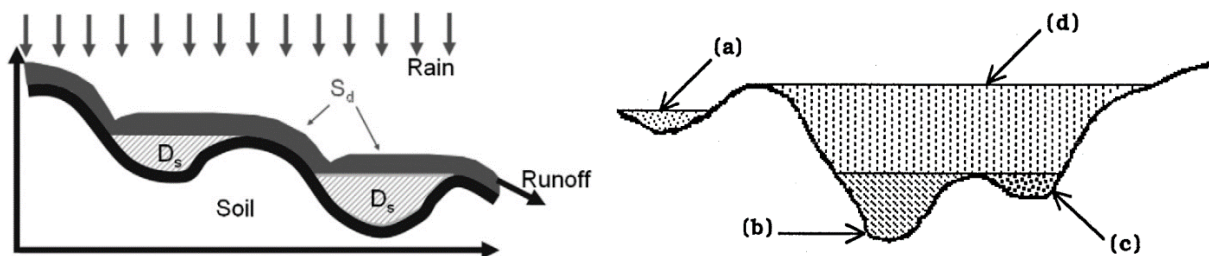


Figure 3: A gauche : schéma illustrant la distinction entre D_s et S_d (Antoine *et al.*, 2012). A droite : schéma montrant les dépressions du sol et leur capacité de rétention et détention superficielle (Hairsine *et al.*, 1992). L'eau commence par s'accumuler en (a), (b) et (c). L'eau peut s'accumuler en (a) et (c) pour finalement déborder et remplir (b). Du ruissellement ne sera observé que lorsque (d) sera complètement rempli.

Les méthodes liées au *conservation tillage* et au *terracing* permettent en outre d'augmenter la capacité de rétention en eau dans les dépressions du sol et de limiter et mieux gérer le ruissellement, en modifiant le relief et le microrelief du sol. Ce sont ces différentes méthodes qui sont reprises et décrites dans cette section.

2.5.2. *Contour farming* & *contour tillage*

Le *contour tillage* est une méthode consistant à travailler le sol perpendiculairement au sens de la pente, suivant les courbes de niveau du relief (Fig. 4) (Morgan, 1995 ; Unger *et al.*, 2010). Ainsi, les pertes en sol liées à la pente sont épargnées. Cette méthode n'est utile que pour des parcelles de longueur dépassant les 180m, présentant une pente supérieure à 1,75% et inférieure à 10% (Blanco et Lal, 2010), et n'est efficace que pour des événements orageux de faible intensité (Morgan, 1995). Une récente étude a démontré des taux de réduction du

ruissellement et des pertes en terre de 32% et 49.5% respectivement, avec l'application du *contour farming* (Farahani *et al.*, 2016).

Pour des pentes plus abruptes, il y a lieu d'alterner des bandes de gazon (ou autre culture) avec la culture implantée, également le long des courbes de niveau (Unger *et al.*, 2010). La méthode, dénommée *strip till* (Fig. 4), pour laquelle les bandes ne sont pas labourées, permet de réduire davantage la vitesse de ruissellement (Hudson, 1981).

Un meilleur contrôle de l'érosion hydrique et de la rétention en eau a été observée lorsque des crêtes/billons (*ridges*) complètent le *contour tillage* (cfr. §2.5.3) (Morgan, 1995 ; Shaxson et Barber, 2003 ; Unger *et al.*, 2010). Cette combinaison appelée *lister tillage* montre une grande efficacité dans la rétention d'eau, mais son efficacité diminue largement après l'implantation de la culture (Unger *et al.*, 2010). Selon la hauteur des crêtes et l'importance de l'érosivité (entre autres), les pertes en terre se voient réduites de 30 à 50 % (Toy *et al.*, 2002).



Figure 4: A gauche : *contour farming* (source : NRCS Georgia USDA) ; à droite : *strip till* (source : NRCS USDA).

2.5.3. *Tied ridging & furrow diking*

Le *tied ridging* (cloisonnement), également appelé *furrow diking*, consiste à couvrir l'entièreté de la surface avec des *ridges/dikes* (crêtes/digues) faiblement espacées. Plusieurs séries de dépressions rectangulaires sont ainsi formées (Hudson, 1981 ; Morgan, 1995), permettant d'optimiser la rétention en eau mais également d'allouer plus de temps à l'infiltration de l'eau dans le sol (Shaxson et Barber, 2003). Une réduction du ruissellement allant jusqu'à 300% peut être observée grâce à cette technique (USDA, 2016). Ghuzza (2003) a démontré que le *tied ridging* constitue la méthode la plus efficace en termes de rétention d'eau, comparé à l'utilisation de herse à disques, au *strip till* ou encore au non-labour. Ghuzza (2003) a calculé des *Ds* pour le *tied ridging* variant entre 15 et 30 mm selon le cumul pluviométrique. Le cloisonnement des interbuttes est un cas particulier de *tied ridging* où des billons principaux sont déjà présents (ex : pomme de terre). Dans ce cas, la terre entre les billons principaux est raclee puis relevée pour former les crêtes, formant les différentes dépressions dans le sol (PROTECT'eau, 2018).

A l'origine, la méthode provient des Etats-Unis dans les années 1930, mais a été abandonnée dans les années 1950 car la méthode se voyait difficile et lente à mettre en place, engendrant en outre des rendements limités. Le *tied ridging* s'est vu réinstauré dans les années 1980 avec les améliorations technologiques, et se voit plutôt utilisé en période de croissance végétale quand le sol est nu (Unger *et al.*, 2010). Les pertes en terre se sont montrées largement réduites lors d'une étude à Gaza (Morin *et al.*, 1984), présentant des taux d'érosion de 0.16 t ha⁻¹ et 0.07 t ha⁻¹ selon l'espacement des crêtes, contre 0.29 t ha⁻¹ pour une culture plane. La méthode semble aujourd'hui avoir fait ses preuves aux Etats-Unis pour des cultures telles que le maïs, le tournesol, le coton ou encore le sorgho (Jones et Baumhardt, 2003). Le *tripping paddle diker*, machine la plus courante actuellement aux Etats-Unis, crée de larges digues pour un *Ds* estimé à 50-60 mm (Fig. 5) (Jones et Clark, 1987 ; Jones et Baumhardt, 2003). Une étude sur le *tied ridging* en culture d'orge (Ethiopie) a récemment montré une réduction du ruissellement de 16 à 30%, pour une augmentation de la teneur en eau supérieure à 13% dans la zone racinaire (Araya et Strootsnijder, 2010). Jones et Clark (1987) déduisent, sur base de 28 ans de données de ruissellement, que le *furrow diking* permet de retenir 25 à 30 mm d'eau.



Figure 5: Furrow dikes (gauche) et Tripping paddle diker (droite) (Jones et Baumhardt, 2003). L'image de gauche montre la différence entre une parcelle témoin et une parcelle travaillée. On constate les effets érosifs ainsi que la perte en eau sur la parcelle lorsque le sol n'est pas travaillé.

La méthode s'est vue très utile et a montré un franc succès en Afrique de l'Est, sur des sols profonds et perméables, comme le montre la figure 6 où l'on peut observer ces *tied ridges* en culture de maïs en Tanzanie. A l'opposé, la méthode a été un échec en Afrique Centrale, où les sols sont peu profonds (Hudson, 1981). En effet, Morgan (1995) fait remarquer que cette méthode ne doit être utilisée que sur des sols à drainage favorable, sous peine d'endommager la culture implantée. Hudson (1981) conseille également deux mesures. D'une part, le sommet des crêtes doit être plus bas que les billons principaux de sorte que l'écoulement continue à se faire dans le sens des crêtes et non dans celui de la pente en cas de ruissellement soudain. D'autre part, il serait utile de mettre en place des terrasses (*cfr.* §2.5.6) en aval, en guise de renfort supplémentaire contre du ruissellement important, dans le cas où un événement exceptionnel surgirait.



Figure 6: A gauche : Tied ridges observés en culture de maïs, Tanzanie (Hudson, 1981). A droite : exemple de crêtes formées pour retenir l'eau dans des cultures sarclées (Shaxson, 2003). On remarque que les sommets des crêtes sont plus bas que les billons principaux de sorte que l'eau s'écoule entre les crêtes plutôt que se déverser entre les billons principaux.

Shaxson et Barber (2003) nous avertissent des limitations liées à ces techniques. La capacité de rétention des dépressions est par défaut limitée et diminue rapidement au plus la pente augmente. Pour des pentes supérieures à 5%, la capacité de rétention des dépressions est considérablement réduite. Shaxson et Barber (2003) insistent également sur l'importance que joue la structure du sol sur la rétention en eau dans le microrelief. Pour des sols présentant une faible stabilité structurale, l'eau de ruissellement est alors capable de faire s'écrouler les crêtes, diminuant et limitant la capacité de rétention des dépressions.

En Europe, différents dispositifs ont été récemment élaborés pour effectuer du *tied ridging* : le *Barbutte* (Ets Cottard - France), le *Dyker* (Grimme - Allemagne) ou encore les cloisonneuses de DEMA-Construct (Belgique) ou de Netagco-Rumpstad/ AgriMaas (Pays-Bas). En Wallonie, plusieurs essais de *tied ridging* ont été réalisés durant la dernière décennie (PROTECT'eau, 2018 ; Agr'Eau, s.d.) sur différentes cultures : cloisonnement des interbuttes en pomme de terre grâce au Barbutte, mais également en culture de carottes par le CPL-VEGEMAR. Ces études ont permis d'estimer une capacité de rétention dans les dépressions de 15 à 20 mm (Agr'Eau, s.d.). Le projet européen «LIFE SWAP-CCP» (2006-2007) ainsi que le projet «Contrôle du ruissellement et de ses impacts en culture de pommes de terre en Wallonie» (2009-2010) ont montré des résultats très concluants pour l'utilisation du Barbutte (PROTECT'eau, 2014 ; 2018) : diminution du ruissellement de 97 et 70% respectivement, et diminution des pertes en terre de 99 et 88%.

Même s'il y ressemble, le travail du sol effectué par le rouleau antiérosif du CIPF ne peut être considéré comme du *tied ridging* au sens strict, dans le sens où des crêtes ne sont pas réellement créées mais ce sont plutôt des dépressions dans le sol qui sont formées. Morgan (1995) mentionne une technique similaire au *tied ridging*, pour laquelle une série de puits sont creusés en rangées. Cette technique, dénommée *range pitting*, montre 50% de sa capacité de stockage perdue après 8 ans, et 90% après 28 ans (Neff, 1973).

La méthode et ses impacts restent similaires à celles décrites précédemment. L'ensemble des essais mentionnés ont tous montré des résultats très concluants, et le *tied ridging* pourrait être testé pour d'autres cultures sarclées comme la chicorée (PROTECT'eau, 2018).

2.5.4. Zai & demi-lunes

Dans les régions arides et semi-arides du Sahel, de nombreuses techniques ont été mises au point pour optimiser la rétention et l'utilisation de l'eau dans les cultures (Roose, 1996). Parmi celles-ci, on retrouve des méthodes traditionnelles telles que le *zai* ou les demi-lunes (Shaxson et Barber, 2003). Ces deux méthodes sont réputées pour la réhabilitation des sols appauvris dans le Sahel (Roose *et al.*, 1999 ; Shaxson et Barber, 2003 ; Zougmore *et al.*, 2003 ; Ouedraogo et Sawadogo, 2000).

Les *zai* pits sont des puits d'ensemencement profonds de 15 cm environ, pour un diamètre de 40 cm, et sont généralement placés tous les 80 cm (Fig. 7). Le sol étant très sec et relativement battant, l'eau peut ruisseler depuis celui-ci jusque dans ces poquets, où un équilibre très particulier s'effectue. Les termites profitent des résidus organiques, apportés par le vent, qui se retrouvent dans le fond des puits et prolifèrent. Ceci mène à la formation de nombreuses galeries qui vont lier la surface des puits aux horizons plus profond du sol. Ces galeries permettent dès lors une meilleure infiltration de l'eau et créent de larges poches d'humidité, protégeant l'eau de l'évaporation (Fig. 7) (Roose *et al.*, 1999). Grâce à ce réseau souterrain, un meilleur recyclage de l'eau, enrichie en nutriments, est observé (Roose *et al.*, 1999 ; Shaxson et Barber, 2003).

Concernant sa capacité de stockage, le *zai* permet au sol de capturer jusqu'à 900 mm d'eau pour une pluie de 400 mm, selon les estimations de Roose *et al.* (1993), ce qui revient à accroître le volume d'eau disponible de 2.25 fois la quantité de pluie tombée au sol. En effet, les poches d'humidité peuvent atteindre jusqu'à 1 m de profondeur sous les cuvettes du *zai* (Roose *et al.*, 1993). De même, Amede *et al.* (2011) ont montré que le *zai* permet d'augmenter la productivité de l'eau de 300 à 700%. Bien qu'efficace, la méthode reste laborieuse, exigeant environ 60 jours de travail par hectare (Zougmore *et al.*, 2014).

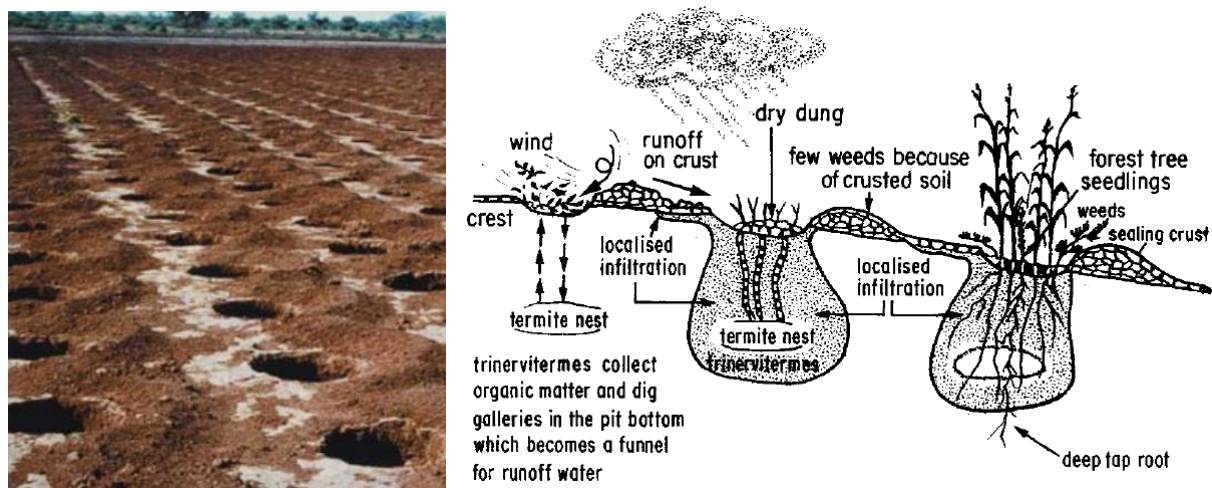


Figure 7: A gauche: exemple de *zai* observé au Niger (Shaxson, 2003). A droite: principe de la méthode du *zai* et visualisation des poches d'humidité (d'après Roose *et al.*, 1999).

Les demi-lunes sont des digues en terre de 2 à 6 mètres de large, qui tiennent directement leur nom de la forme qu'elles présentent (Fig. 8). Shaxson et Barber (2003) apparentent les demi-lunes au *zai*, excepté que ces digues présentent de plus larges puits. Les demi-lunes servent de collecteur d'eau, sur des pentes douces inférieures à 3% (Zougmore *et al.*, 2003). Les eaux de ruissellement sont dirigées vers leur centre, où elles peuvent s'accumuler et favoriser l'infiltration. L'eau en excès peut déborder de chaque côté du dispositif pour s'écouler vers une autre demi-lune, agencée de façon décalée (Shaxson et Barber, 2003). Des cordons pierreux sont couramment disposés sur le contour de chaque demi-lune, pour favoriser davantage la rétention et l'infiltration de l'eau (Zougmore *et al.*, 2014).

Alors que la densité des demi-lunes (nombre par hectare) est relativement variable (la mise en place des demi-lunes sans matériel adéquat peut s'avérer très laborieuse), la capacité de rétention théorique d'une demi-lune est de 1000 litres par demi-lune (Malagnoux, 2008). Avec cette technique, les teneurs en eau massiques se montrent supérieures aux teneurs observées pour un même sol sans demi-lunes, mais elles restent faibles, ne dépassant jamais les 300 g kg^{-1} (Zougmore *et al.*, 2003). Ceci est dû principalement aux faibles taux d'infiltrations caractéristiques des sols sahéliens, très encroûtés et présentant de faibles capacités de rétention en eau (Roose *et al.*, 1999).



Figure 8: Exemple de demi-lunes observées au Niger (Shaxson, 2003).

2.5.5. Contour bunds

Les *contour bunds* et terrasses (*cfr.* §2.5.6) sont des méthodes de travail du sol à plus large échelle utilisées lorsque les méthodes de *conservation tillage* (*contour tillage*, *strip cropping* ou *tied ridging*) ne sont pas assez efficaces contre l'érosion hydrique (Greco, 1978 ; Unger *et al.*, 2010). Les *contour bunds* sont des digues de terres construites en travers de la pente, larges de 1 à 2 mètres, suivant les courbes de niveau. Ces digues divisent la parcelle en segments relativement parallèles, ce qui a pour conséquence de réduire la longueur effective de la pente et de limiter la vitesse de ruissellement (Fig. 9) (Banco et Lal, 2010). Les digues

forment alors une zone en amont où l'eau de ruissellement peut être stockée (Morgan, 1995) et aucune perte n'est observée lorsqu'elles sont correctement agencées, selon Critchley *et al.* (1991). Blanco et Lal (2010) indiquent que les *stone bunds* sont particulièrement efficaces en régions montagneuses, en réduisant de manière combinée les pertes en terre liées à l'érosion hydrique, éolienne mais aussi aratoire. L'efficacité des *stone bunds* a été démontrée pour différentes études, que Blanco et Lal résument en 2010 : réduction de 33 à 78 % des pertes en terre dans les Andes (Amérique du Sud), ou bien dans les hauts plateaux d'Éthiopie, où les pertes en terre, initialement de $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, se voient réduites à des quantités négligeables.

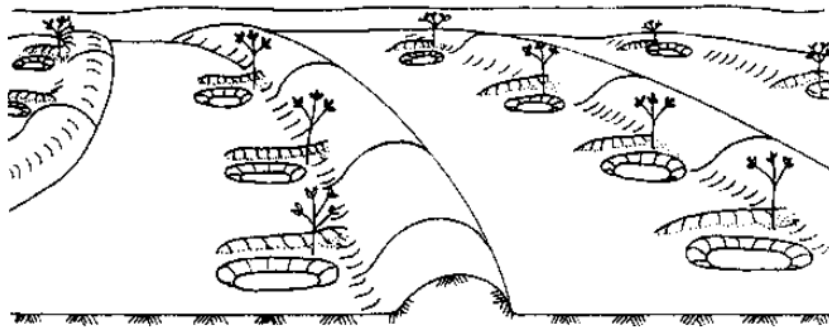


Figure 9: Schéma de contour bunds observés au Kenya (Critchley *et al.*, 1991).

2.5.6. Terracing

Le *terracing* désigne l'établissement de culture en terrasses, remblais de terres construits en travers de la pente (Fig. 10). Les terrasses permettent de réduire la longueur de celle-ci et diminuent ainsi la vitesse du ruissellement (Morgan, 1995). Le terrain est divisé en segments parallèles et souvent combiné à des structures comme des canaux, permettant d'évacuer l'eau à une vitesse limitée vers un exutoire adéquat (Blanco et Lal, 2010). Morgan (1995) distingue 3 catégories de terrasses : *diversion*, *retention* & *bench terraces*. Les terrasses de diversion servent à intercepter le ruissellement et l'acheminer de manière adéquate jusqu'à un exutoire. Les terrasses de rétention permettent quant à elles de stocker l'eau sur les versants et sont généralement conçues pour retenir des volumes d'eau de période de retour égale à 10 ans. Les terrasses de type *bench* (« en banquettes ») présentent une succession de plateaux et surélévations, permettant de cultiver sur des pentes abruptes, jusqu'à 58%. Les terrasses se distinguent des *contour bunds* car elles sont plus larges et conçues de manière plus exigeante. En effet, les dimensions d'une terrasse ou encore les dimensions et l'emplacement des canaux d'évacuation doivent être étudiés en détail (Morgan, 1995).

Cette technique, mise au point dès les débuts de l'agriculture, permet de cultiver les versants en régions montagneuses et est retrouvée dans de nombreux pays à travers le monde, tels que la Chine, le Pérou, ou encore dans l'Himalaya. A titre d'exemple, en Jamaïque, les pertes en terre sur une culture pentue de 30 % sont passées de $133 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ à $17 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ grâce à l'utilisation de terrasses de type *bench* (Sheng, 1981).

De plus, la part du sol extraite lors de l'aménagement des terrasses est réutilisée, augmentant la profondeur du premier horizon et facilitant ainsi la mise en place des cultures (Blanco et Lal, 2010). Greco (1978) rajoute que les terrasses et les *contour bunds* entre autres permettent de répondre à une forte pression démographique quand les terres vouées à l'agriculture tendent à manquer. Actuellement, cette méthode n'est que peu utilisée aux Etats-Unis, principalement à cause des coûts considérables pour mettre le sol à niveau lors de la formation des terrasses (Unger *et al.*, 2010).



Figure 10: Exemple de terrasse (source : NRCS Georgia USDA).

2.6. Photogrammétrie rapprochée et génération de MNT pour la caractérisation du microrelief

La photogrammétrie désigne « l'ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions et la position d'un objet (au sens le plus large du terme) à partir de perspectives de cet objet enregistrées » (Encyclopædia Universalis, 2018). En photogrammétrie rapprochée (*close-range photogrammetry*), la distance entre l'appareil photo et l'objet est assez faible (Abd Elbasit *et al.*, 2009), allant de 1 à 100 m selon Kraus et Waldhaüs (1998). En prenant plusieurs photographies d'un même objet sous des angles de vue légèrement différents, il est possible de reconstituer une image en 3D. Le processus nécessite alors un recouvrement suffisant (en général 60%) entre deux photographies au minimum (Abd Elbasit *et al.*, 2009).

Depuis les 40 dernières années, les recherches ont montré un intérêt particulier dans l'étude du microrelief et son importance dans de nombreux processus hydrologiques (Abd Elbasit *et al.*, 2009 ; Mirzaei *et al.*, 2012). Grâce à un MNT et sur base du microrelief, différents paramètres hydrologiques, dont la capacité de rétention des dépressions D_s , peuvent être étudiés (Abd Elbasit *et al.*, 2009). Historiquement, le D_s était estimé sur base de la rugosité (Moore *et al.*, 1979 ; Onstad, 1984 ; Kamphorst *et al.*, 2000). Depuis peu, les recherches ont

montré qu'il était possible d'estimer directement le D_s sur base du microrelief (Antoine *et al.*, 2009 ; Peñuela *et al.*, 2013).

Dans ce contexte, la photogrammétrie rapprochée constitue un outil efficace permettant de modéliser le microrelief et de l'étudier à ces fins. Parmi les nombreuses applications de la photogrammétrie dans ce domaine, on peut citer à titre d'exemple : Bruneau et Gascuel-Odoux (1990) qui ont caractérisé le microrelief au sein d'une parcelle de maïs pour déterminer les écoulements préférentiels ; Helming *et al.* (1992) qui ont déterminé la capacité de rétention des dépressions sur base d'un MNT, en estimant pour chaque dépression sa circonférence, sa surface et son volume ; Mirzaei *et al.* (2012) qui ont étudié l'effet de la pluie sur la rugosité ; Peñuela *et al.* (2016) qui ont récemment utilisé la photogrammétrie rapprochée pour obtenir un MNT et étudier la connectivité hydrologique de parcelles agricoles.

La photogrammétrie est désormais une méthode courante d'acquisition de modèle 3D et MNT à petite échelle, simple et rapide (Abd Elbasit *et al.*, 2009), les mécanismes de génération de MNT étant connus et les temps de calculs relativement faibles (Helming *et al.*, 1992).

3. Objectifs

Ce mémoire s'inscrit dans un contexte de réduction du ruissellement et de l'érosion par le combiné de semis ERuiStop et voit dès lors un double objectif. Le premier consiste à évaluer l'efficacité du combiné de semis ERuiStop sur base des analyses du CIPF. Alors que le CIPF a mesuré diverses variables liées au combiné de semis, chaque année indépendamment l'une de l'autre, le but ici sera d'analyser ces données de façon pluriannuelle. On peut ainsi espérer obtenir des résultats plus robustes et tenant plus compte de la variabilité spatiale et/ou temporelle du terrain. On peut donc espérer dégager une tendance pour l'ensemble des 5 ans du projet, plus générale et donc plus objective de la réalité, concernant l'efficacité du combiné de semis ERuiStop.

Le second objectif vise à caractériser les dépressions formées dans le sol par le combiné de semis ERuiStop, en utilisant la technique de photogrammétrie rapprochée. La capacité de rétention en eau de ces dépressions pourra être ensuite déterminée, ainsi que certaines informations liées au comportement hydrologique de surface du sol.

4. Matériel et méthodes

Dans cette partie, une première section présente la méthodologie liée aux données récoltées par le CIPF et à leur analyse pour évaluer l'efficacité du combiné de semis ERuiStop. La seconde partie explique quant à elle toutes les étapes ayant permis de caractériser et analyser les dépressions du combiné de semis.

4.1. Analyse des données du projet ERUISTOP

Dans cette section, l'ensemble de la démarche permettant de répondre au premier objectif est détaillée. Le combiné de semis ERuiStop ainsi que les sites étudiés sont tout d'abord présentés et décrits. Les données d'intérêt sont ensuite également présentées pour enfin expliquer l'ensemble de l'approche liée au traitement des données en question. Une attention particulière sera portée à la problématique liée aux données de pluie.

4.1.1. Description du combiné de semis ERuiStop

Initialement dénommé « rouleau à barres adapté » ou « rouleau antiérosif », cet outil développé par le CIPF, en collaboration avec l'usine LSM DF, crée plusieurs séries de dépressions dans les interlignes du maïs (Fig 11). Les dépressions permettent une meilleure gestion des eaux de ruissellement, en limitant les pertes en terre et en produits phytosanitaires. Durant les cinq années du projet ERUISTOP, le rouleau a été modifié et amélioré pour aboutir au « combiné de semis ERuiStop » en 2017. Le combiné inclut un semoir de précision, une rotative et le rouleau antiérosif (Fig 12). Un seul passage sur la parcelle suffit pour effectuer la préparation du sol et le semis. Cela permet également de ne pas dégrader les dépressions lors d'un second passage.



Figure 11: A gauche : vue détaillée des barres constituant le rouleau antiérosif. A droite : vue détaillée des dépressions créées dans les interlignes (source : CIPF).



Figure 12: Combiné de semis ERuiStop du CIPF. De gauche à droite : semoir, rouleau antiérosif, rotative (source : CIPF).

4.1.2. Sites étudiés

Différents sites ont été étudiés lors du projet ERUISTOP pour leur aptitude à subir du ruissellement, en raison de parcelles relativement pentues. Parmi ceux-ci, quatre sites ont été retenus dans le cadre de cette étude, pour des raisons pratiques (présence de données à analyser ou bien nombre de données suffisantes).

Les quatre essais se situent à Hennuyères, Virginal, Ittre et Ottignies-Louvain-la-Neuve (Fig. 13). Les localisations précises des parcelles se trouvent en annexe 8.1 et les caractéristiques de chaque essai (variété de maïs, calendrier cultural et amendements) sont résumées sous forme de tableaux en annexe 8.2. Ces sites ont été étudiés à des moments différents durant la durée du projet, entre l'été 2012 et l'été 2017, comme le montre le tableau 2.

Tableau 2: Années et sites pour lesquels les données ont été récoltées. Les cadres rouges mettent en évidence les années pour lesquelles deux sites ont été analysés en parallèle.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<i>Hennuyères</i>						
<i>Virginal</i>						
<i>Ottignies</i>						
<i>Ittre</i>						

Localisation des parcelles d'étude du CIPF

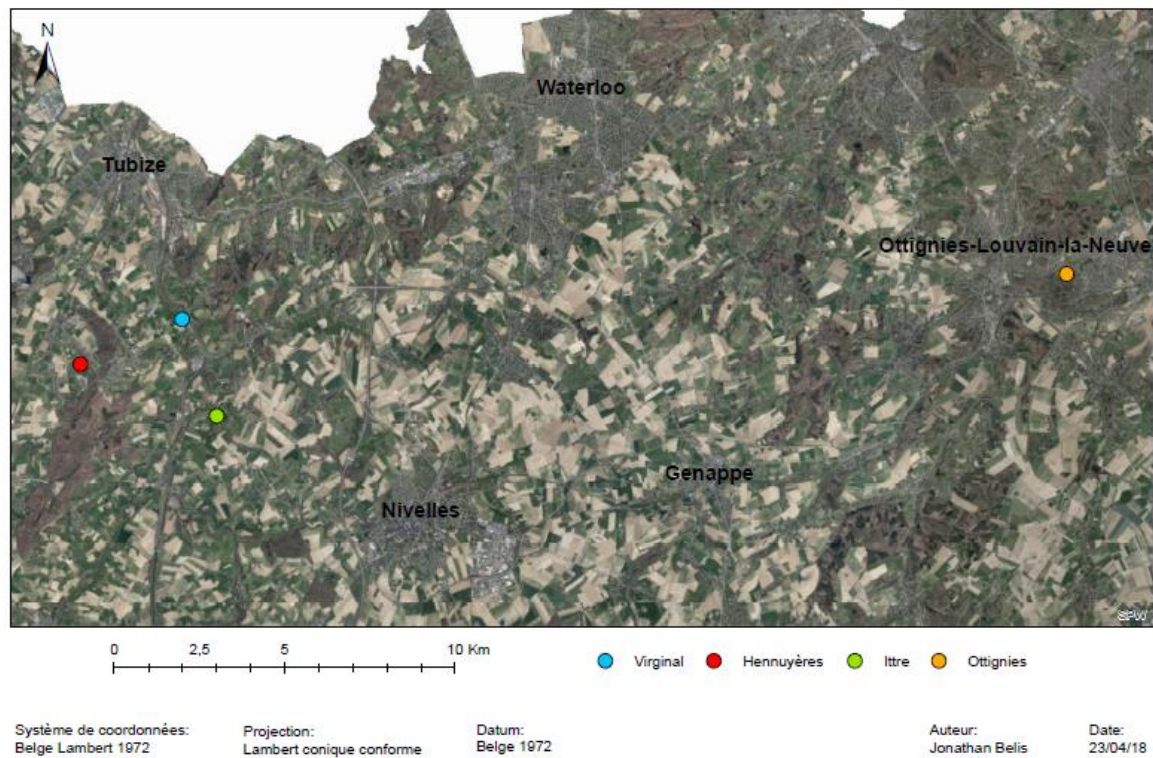


Figure 13: Carte présentant les sites étudiés par le CIPF retenus pour l'analyse des données.

L'ensemble des parcelles étudiées ont une pente, mesurée au télémètre par le CIPF, supérieure ou égale à 10% (*cfr.* Tab. 6). La texture du sol a été quant à elle déterminée par analyse granulométrique par les laboratoires du Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR) à La Hulpe, selon la norme NF X 31-107 : 5 fractions texturales sont obtenues par sédimentation, sans décarbonatation préalable (CIRAD, 2014). L'ensemble des résultats est présenté dans les tableaux 4 et 5 plus bas.

L'indice de battance a été recalculé pour chaque site en utilisant l'équation suivante (Rémy et Marin-Laflèche, 1974) :

$$R = \frac{1.5 \times LF + 0.75 \times LG}{A + 10 \times MO}$$

Où

- R = risque de battance ;
- LF = % de limons fins ;
- LG = % de limons grossiers ;
- A = % d'argiles ;
- MO = % de matière organique.

Une nouvelle formulation en 1977 (programme CERES) introduit un facteur correctif C à soustraire lorsque le pH est supérieur à 7 (Baize et Darboux, 2013) :

$$C = 0.2 \times (pH - 7)$$

$$R \text{ ou } I = \frac{1.5 \times LF + 0.75 \times LG}{A + 10 \times MO} - C$$

Baize et Darboux (2013) redéfinissent un nouvel indice de battance :

$$IB = 5 \times (R - 0.2)$$

Cet indice permet *in fine* de caractériser l'horizon de surface (Tab. 3) :

Tableau 3: Caractère battant de l'horizon de surface selon l'indice de battance, selon la méthode de Baize et Darboux (2013).

Horizon de surface	Indice de battance IB
Très battant	> 9
Battant	9 > IB > 8
Assez battant	8 > IB > 7
Peu battant	7 > IB > 6
Non battant	< 6

Tableau 4: Résultats d'analyse granulométrique exprimés sur matière sèche décarbonatée (CPAR), effectuée pour les sites d'Ottignies et Ittre (2015) et Hennuyères (2012).

Site	Argile % < 0.002 mm	Limon fin % 0.002 - 0.02 mm	Limon grossier % 0.02 - 0.05 mm	Sable fin % 0.05 - 0.2 mm	Sable grossier % 0.2 - 2 mm
Ottignies	18.4	23.7	45.8	8.1	4.0
Ittre	16.3	17.1	35.5	22.0	10.0
Hennuyères	13.8	16.4	38.7	26.5	4.7

NB : le bulletin d'analyse de granulométrie pour le site de Virginal est manquant. Seules les quelques informations reprises dans le rapport ERUISTOP (pH, taux d'humus et indice R) sont disponibles et ont été partiellement retranscrites dans le tableau 5. Les informations relatives à la texture n'étant pas disponibles, il est impossible de recalculer un indice R pour Virginal. L'indice R présenté dans le tableau est donc celui fourni par le rapport ERUISTOP.

Tableau 5: Résultats d'analyses chimiques de caractérisation (CPAR) ; calcul du risque de battance R et de l'indice de battance IB ; type de sol selon la carte numérique des sols de Wallonie (CNSW – WalOnMap).

Lhp = limon sableux fortement gleyifié sans développement de profil.

LDa = limon sableux faiblement à modérément gleyifié à horizon B textural.

Adp = limon modérément gleyifié sans développement de profil.

Abp = limon non gleyifié sans développement de profil.

Site	pH_KCl 1N	pH_eau	C organique [g/kg]	Humus %	R	IB	Sol
Ottignies	6.8	7.6	10	1.9	1.75	7.74	Lhp
Ittre	5.7	6.8	11	2.1	1.40	6.01	LDa
Hennuyères	6.3	7.1	16	3.2	1.16	4.75	Adp
Virginal		7.4		2.1	1.91	8.55	Abp

Le tableau 6 ci-dessous permet de synthétiser les pentes texture pour chaque site étudié.

Tableau 6: Caractéristiques principales des sites étudiés. Le caractère battant est déduit selon la méthode proposée par Baize et Darboux (2013).

<i>Site</i>	<i>Pente</i>	<i>Classe texturale</i>	<i>Battance</i>
Ottignies	16%	Limon fin argileux	<i>assez battant</i>
Iltre	11%	Limon fin	<i>peu battant</i>
Hennuyères	10%	Limon fin	<i>non battant</i>
Virginal	11%	Limon fin	<i>battant</i>

La classe texturale des différents sols a été déterminée sur base des analyses granulométriques reportées sur les triangles texturaux (annexe 8.3).

4.1.3. Nature et acquisition des données

Chacun des sites mentionnés précédemment constitue un essai pour lequel deux traitements sont attribués. Le premier consiste au passage du combiné ERuiStop (*cfr. §4.1.1*) tandis que le second sert de témoin. Ces deux traitements sont appelés respectivement traitement « ERUISTOP » et « Témoin ». Le traitement Témoin consiste en un semis classique réalisé avec un semoir de précision MONOSEM de 4 rangs. Pour chacun des traitements, le sol a au préalable été labouré avant d'effectuer un passage avec une herse rotative.

Trois répétitions sont effectuées par traitement sur des parcelles conjointes (excepté pour l'essai d'Hennuyères où seulement 2 répétitions ont été effectuées). La superficie des parcelles expérimentales était initialement de 75 m² en 2012 et 2013 (25 m de longueur pour 3 m de largeur, la largeur correspondant à celle de 4 lignes de semis) pour finalement être de 72 m² depuis l'année 2014 jusqu'à la fin du projet.

Trois types de données ont été mesurées pour évaluer l'efficacité du combiné de semis :

- Précipitations cumulées [mm]
- Volumes de ruissellement [mm]
- Concentrations en sédiments [g/L]

Les précipitations servent de support pour les autres données : chaque ruissellement et concentration en sédiments a été mesuré pour un cumul pluviométrique particulier.

Les données de ruissellement ainsi que les concentrations en sédiments ont pu être collectées à l'aide de bacs d'une capacité maximale de 500 litres (Fig. 14). Si le ruissellement dépasse ce volume, le bac de récolte déborde et les données se voient sous-évaluées. Chaque parcelle expérimentale est délimitée par des bandes de plastique rigide afin d'acheminer au mieux les eaux de ruissellement vers le bac de récolte, situé en aval (Fig. 15).

Les volumes de ruissellement sont mesurés à l'aide d'une pompe et d'un débitmètre. Les concentrations moyennes en sédiments sont mesurées sur base d'échantillons d'un litre. Les sédiments en suspension sont récoltés depuis les bacs et agités vigoureusement de façon à obtenir une solution la plus homogène possible avant d'être mis à l'étuve à 65°C pendant 48h jusqu'à évaporation complète de l'eau. Des pesées répétées en fin de séchage permettent de vérifier que la masse de sédiments reste constante et n'évolue plus.



Figure 14: Dispositif expérimental de récolte d'eaux de ruissellement et de sédiments (source : CIPF).



Figure 15: Disposition des parcelles d'essais sur la parcelle expérimentale et dispositif de mesure (site d'Ottignies). On peut observer les bandes de plastique rigide délimitant les parcelles ainsi que les bacs de récolte (ici recouverts par une tôle) (source : CIPF).

Concernant la récolte des données de pluie, deux pluviomètres ont été installés sur chaque site. Un pluviomètre classique à lecture directe est placé au niveau même de l'essai, tandis qu'un pluviomètre à augets basculeurs est placé à une centaine de mètres. Les relevés manuels du pluviomètre classique servent à recenser une valeur fiable du cumul de pluie responsable du ruissellement observé. Le pluviomètre à augets permet quant à lui d'avoir une information concernant les intensités horaires, avec une précision de 0.254 mm (un basculement = 0.254 L/m²).

L'ensemble des données décrites ci-dessus ont été fournies par le CIPF, par le biais des tableaux *Excel* reprenant les résultats, ou encore via les rapports annuels du projet. Les cumuls de pluie fournis sont ceux mesurés par les pluviomètres classiques.

4.1.4. Problématique liée aux données pluviométriques

Plusieurs contraintes liées aux données pluviométriques ont rendu complexes l'analyse et le traitement des données et n'ont pas permis de pousser l'analyse des données aussi loin que ce qui était prévu initialement. Celles-ci sont expliquées en détail dans cette section afin de comprendre au mieux les démarches mises en œuvre pour répondre aux objectifs cités précédemment.

Il est important de préciser que ces contraintes n'ont été perçues qu'en cours de travail. Les solutions ont dû être apportées sur le moment pour y remédier.

4.1.4.1. Récolte des données

NB : Pour simplifier les explications et analyses, le concept de pluies *ruisselantes* et *non ruisselantes* est introduit. Une pluie ayant conduit à du ruissellement est définie comme *ruisselante* (P_R) tandis qu'une pluie pour laquelle aucun ruissellement n'est observé est qualifiée de *non ruisselante* (P_{NR}). La pluie totale de la saison culturale est donc exprimée comme la somme de ces deux composantes :

$$P = P_R + P_{NR}$$

Lorsqu'une pluie est tombée, un relevé est effectué pour vérifier la présence ou non de ruissellement dans le bac collecteur. Si du ruissellement est observé, le volume est mesuré et le cumul pluviométrique associé est recensé. Si aucun volume d'eau n'est observé, le pluviomètre classique est « remis à zéro » (vidé) : *dans certains cas, la pluie était recensée, dans d'autres non.*

En effet, dans le cadre du projet ERUISTOP, le but est de démontrer l'efficacité du rouleau sur base du ruissellement. Dans ce contexte, seules les pluies *ruisselantes* étaient jugées utiles et donc recensées. Jusqu'en 2014, aucune pluie *non ruisselante* n'a été recensée et seules des pluies *ruisselantes* sont notées. A partir de 2015, les données non ruisselantes sont notées mais la méthodologie reste imparfaite : il arrivait que certaines pluies non ruisselantes ne soient pas recensées avant de remettre le pluviomètre à zéro (Tab. 7). Il en résulte que l'entièreté de la pluviométrie sur la saison culturale n'est connue pour aucun essai.

Par ailleurs, les relevés n'étaient pas effectués systématiquement après chaque pluie. Ceux-ci étaient effectués soit de façon périodique (mais avec une périodicité non fixe), soit après des événements pluvieux importants susceptibles d'avoir provoqué du ruissellement. Dans tous les cas, les données pluviométriques correspondent à des cumuls pluviométriques sur

des périodes de quelques jours à quelques semaines selon le cas. L'ensemble des pluies *ruisselantes* et *non ruisselantes* constituent dès lors des données « périodiques » (Fig. 16). Les différentes contraintes citées précédemment auraient pu être levées grâce au pluviomètre à auget. Cependant, il s'est avéré que les données brutes des pluviomètres à augets n'étaient pas sauvegardées. Ces pluviomètres étaient consultés sur place et des informations étaient notées quant aux caractéristiques (intensité maximale horaire) de l'événement pluvieux ayant le plus probablement conduit à la production de ruissellement.

Tableau 7: Pluies disponibles par saison et par site. En bleu foncé : pluies ruisselantes ; en hachuré : pluies ruisselantes et non ruisselantes.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<i>Hennuyères</i>						
<i>Virginal</i>						
<i>Ottignies</i>						
<i>Ittre</i>						

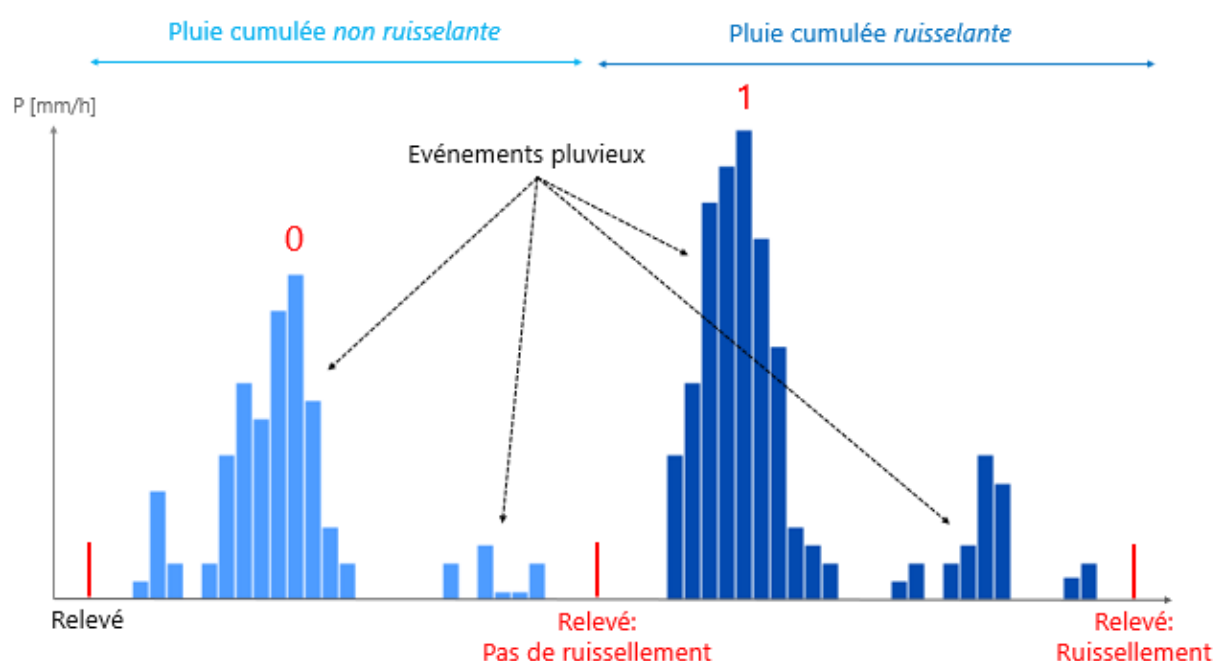


Figure 16: Hyétoگرامme fictif permettant d'expliquer la méthodologie liée aux données de pluie.

Les relevés déterminent la « période » du cumul pluviométrique.

Les indices 0 et 1 désignent l'événement le plus intense de chaque cumul :

0 : l'événement le plus intense n'a pas provoqué de ruissellement ;

1 : l'événement le plus intense est « probablement » à l'origine du ruissellement (on ne peut affirmer que seul cet événement a généré le ruissellement).

4.1.4.2. Données PAMESEB et série temporelle d'Ottignies

En l'absence de données horaires mesurées sur site, une recherche a été effectuée pour identifier des stations météorologiques proches des sites d'expérimentation. Dans le cas du site d'Ottignies, les données de la station météo de la PAMESEB se situant à Louvain-la-Neuve, à 3150 m de l'essai d'Ottignies (annexe 8.4) sont disponibles. Les données climatiques de la station sont enregistrées automatiquement toutes les heures par un pluviomètre à doubles augets basculeurs d'une résolution de 0.1 mm, conçu par l'unité de Génie Rural (GERU) de l'UCL (PAMESEB, 2009).

Afin de vérifier l'adéquation des données de la PAMESEB avec celles du CIPF, les cumuls de pluie sur les 5 périodes d'observations ont été comparés (Tab. 8).

Tableau 8: Comparaison entre les pluies cumulées du CIPF et les pluies cumulées dans les données de la PAMESEB. Les cumuls sont calculés sur base des données disponibles et mesurées par le CIPF.

R : pluie ruisselante ; NR : pluie non ruisselante.

Année	Cumul CIPF	Cumul PAMESEB	Type de pluie
2013	128	127.4	R
2014	309	358.8	R
2015	133	215	R + NR
2016	160	187.1	R + NR
2017	166	190	R + NR

Le coefficient de détermination R^2 entre les deux séries de données pour les pluies périodiques est de 0.63. Une concordance entre les deux jeux de données existe donc, mais elle n'est pas parfaite, surtout pour les pluies périodiques élevées (Fig. 17).

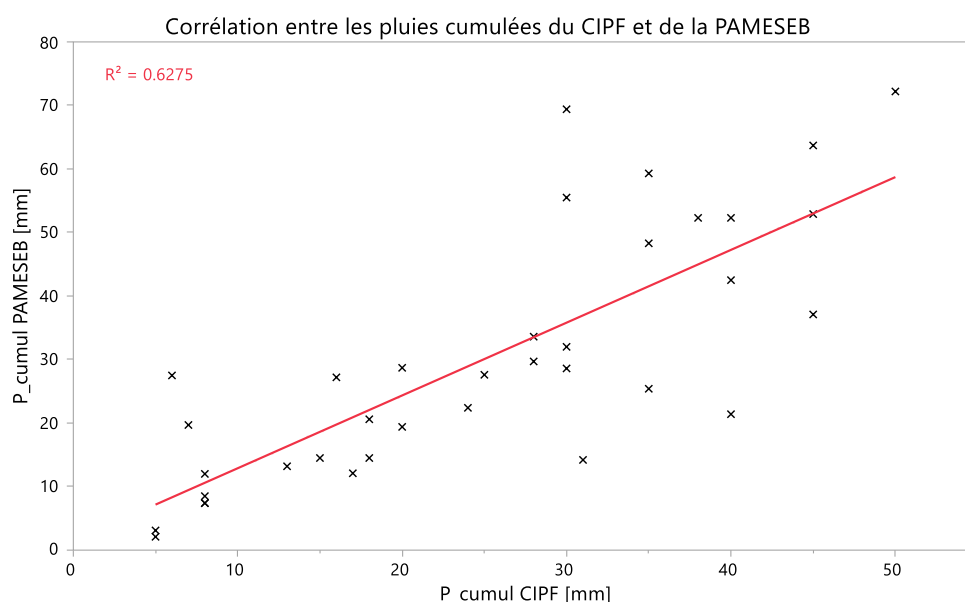


Figure 17: Droite de corrélation entre les pluies périodiques du CIPF et les cumuls de la PAMESEB correspondants.

Deux jeux de données sont dès lors disponibles : d'une part, les ruissellements et concentrations en sédiments selon les pluies mesurées par le CIPF ; d'autre part, ces mêmes ruissellements et concentrations en sédiments selon les pluies de la PAMESEB. Ces jeux de données sont respectivement appelés « données CIPF » et « données PAMESEB ». Dans le cas des données PAMESEB, les pluies journalières mais également les intensités horaires sont connues, en plus des pluies périodiques. Les pluies CIPF et PAMESEB n'étant corrélées qu'à 60%, le jeu de données PAMESEB présentera des résultats dont la précision sera diminuée. Il se voit toutefois indispensable lorsque des informations relatives aux intensités sont nécessaires.

4.1.5. Probabilité d'observer du ruissellement : régression logistique

Sur base des données pluviométriques, il est possible d'estimer l'intensité de pluie pour laquelle un risque de ruissellement est présent. Les données de la PAMESEB sont donc utilisées pour calculer cette probabilité.

Pour définir de manière rigoureuse la probabilité d'observer du ruissellement, une régression logistique est réalisée. Cette régression permet de montrer une relation de dépendance entre une variable à expliquer et une série de variables explicatives, sur base d'une loi logistique. Dans ce cas-ci, il s'agit d'expliquer l'observation ou non du ruissellement (variable à expliquer) selon l'intensité maximale observée (variable explicative).

Concrètement, l'intensité horaire maximale de l'événement pluvieux le plus important au sein de chaque période de cumul pluviométrique est décelée. Une réponse binaire lui est attribuée, selon que du ruissellement est observé ou non au cours de la période (*cfr.* Fig. 16) :

- 0 : pas de ruissellement ;
- 1 : ruissellement.

La régression modélise donc une courbe sigmoïde passant au mieux par l'ensemble des valeurs de 0 et de 1. La probabilité d'observer du ruissellement selon l'intensité maximale est alors lue sur la courbe.

Dans la pratique, il est plus courant de travailler sur base de pluies journalières plutôt que d'intensités horaires. Une même régression est effectuée pour déterminer cette fois la probabilité d'observer du ruissellement selon la pluviométrie journalière. Dans ce cas, la réponse binaire est attribuée aux *pluies* ayant généré du ruissellement (1) ou non (0).

4.1.6. Analyse des données du CIPF

Les données ont été récoltées pour chaque année individuellement (*cfr.* Tab. 2). La totalité des données est alors mise en commun afin d'effectuer une étude pluriannuelle. Pour chaque variable analysée, les résultats obtenus pour les traitements Témoin et ERUISTOP sont comparés, afin de vérifier l'efficacité du combiné de semis. Les cumuls pluviométriques

n'étant pas réguliers, une comparaison directe ne peut être faite entre les sites. Ceux-ci sont donc analysés pour des cumuls saisonniers et ne peuvent être étudiés qu'individuellement. Seuls les sites étudiés pendant une même période peuvent être analysés car les cumuls sont comparables. C'est le cas d'Ottignies et Virginal (2013) et d'Ottignies et Ittre (années 2015 à 2017).

4.1.6.1. Ruissellement cumulé

Estimation des seuils de ruissellement (SR)

En mettant en relation chaque pluie périodique et le volume d'eau ruisselée correspondant, il est possible d'estimer les seuils de ruissellements pour les traitements Témoin et ERUISTOP. Ce seuil correspond à la quantité de pluie pour laquelle du ruissellement commence à être observé.

Estimation des coefficients de ruissellement (CR)

Le coefficient de ruissellement permet de décrire le caractère ruisselant d'une parcelle, indiquant quelle part de la pluie a ruisselé :

$$CR = R/P$$

- CR = Coefficient de ruissellement [-] ;
- R = Ruissellement [mm] ;
- P = Pluie [mm].

Pour comparer les sites entre eux, des coefficients de ruissellement distincts sont calculés sur base des données de pluie disponibles (P_R ou $P_R + P_{NR}$) et comparés entre eux (cfr. Tab. 7).

4.1.6.2. Erosion

Concentrations en sédiments

Les concentrations en sédiments sont mises en relation avec les volumes de ruissellement, facilitant la comparaison témoin-combiné ERuiStop.

Erosion

Les taux d'érosion sont directement déduits des concentrations en sédiments et volumes de ruissellement :

$$E = \frac{C_s \times V_r}{100}$$

- E = Pertes en terre [T/ha] ;
- C_s = Concentration en sédiment [g/L] ;
- V_r = Volume d'eau ruisselée [L/m²].

4.1.7. Estimation du *Curve Number* par optimisation sous contrainte

4.1.7.1. Généralités

Le *Curve Number* est un facteur empirique permettant de caractériser le ruissellement direct au sein d'une parcelle ou d'un bassin versant. Ce paramètre a été mis au point par le Service de Conservation des Ressources Naturelles de L'USDA (*United States Department of Agriculture*).

La méthode du CN calcule une lame d'eau ruisselée sur base d'une lame d'eau précipitée ainsi que du potentiel maximal de rétention du bassin, via l'équation hyperbolique suivante (Hawkins *et al.*, 2009) :

$$Q = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{(P + 0.8 \times S)} \quad P \geq 0.2 \times S$$
$$Q = 0 \quad P < 0.2 \times S$$

- Q = Lame d'eau ruisselée [mm] ;
- P = Lame d'eau précipitée [mm] ;
- S = Potentiel maximal de rétention [mm].

Le potentiel maximal de rétention S désigne la mesure de la capacité du bassin à réduire et retenir les précipitations. Il peut se calculer quant à lui comme suit :

$$S = \frac{(25400 - 254 \times CN)}{CN}$$

Où CN représente le *Curve Number*.

En théorie, les valeurs du CN s'étendent de 0 à 100 :

$$CN = 0 \leftrightarrow S = \infty$$
$$CN = 100 \leftrightarrow S = 0$$

Des études ont démontré que pour certains événements, une quantité de pluie était nécessaire avant de réellement observer du ruissellement. Cette lame d'eau, dénommée *initial abstraction* (I_a), peut être déterminée sur base du potentiel de rétention S :

$$I_a = 0.2 \times S$$

Des études plus récentes ont montré que l'*initial abstraction* donnait des résultats plus adéquats selon la relation suivante (Woodward *et al.*, 2003) :

$$I_a = 0.05 \times S$$

Le ruissellement direct peut dès lors être calculé de la manière suivante :

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad P \geq I_a$$

$$Q = 0 \quad P < I_a$$

4.1.7.2. Optimisation sous contrainte

Le CN est déterminé par optimisation sous contrainte, sur base des données du CIPF. A chaque valeur de ruissellement mesurée est associée une pluie cumulée périodique, toutes deux mesurées par le CIPF. Pour ce cumul périodique, un ruissellement théorique est calculé sur base de la méthode du CN. La somme du carré des écarts entre ruissellements *mesurés* et *calculés* est minimisée, sous contrainte du CN :

$$\text{Min} \sum (Rm - Rc)^2 \quad \text{s. c.} \quad (CN)$$

- Rm = Ruissellement mesuré par le CIPF [mm] ;
- Rc = Ruissellement calculé selon la méthode du CN [mm].

Dès lors l'opération devient :

$$\text{Min} \sum \left(Rm - \frac{\left(P - 0.05 \times \frac{(25400 - 254 \times CN)}{CN} \right)^2}{\left(P - 0.05 \times \frac{(25400 - 254 \times CN)}{CN} + \frac{(25400 - 254 \times CN)}{CN} \right)} \right)^2 \quad \text{s. c.} \quad (CN)$$

- P = Pluie mesurée par le CIPF [mm] ;
- CN = Curve Number [-], variable à modifier pour respecter l'optimisation.

Concrètement, cette opération est effectuée par le solveur Excel, en utilisant une méthode non linéaire (GRG Nonlinear). L'équation ci-dessus définit la fonction objective et le CN la variable à modifier.

4.2. Caractérisation du relief et détermination de la capacité de rétention des dépressions

Cette section présente l'ensemble des démarches effectuées pour d'une part caractériser le relief créé par le rouleau antiérosif par photogrammétrie et d'autre part calculer la capacité de stockage de ce relief en soumettant ce relief à une pluie simulée (calcul numérique).

4.2.1. Photogrammétrie : fonctionnement du logiciel *Agisoft PhotoScan*

Le logiciel *Agisoft PhotoScan* est un programme avancé de modélisation 3D. Il permet de mettre en pratique les principes de la photogrammétrie afin d'aboutir de façon automatisée à un modèle 3D. Toute surface, sur base de photographies, peut donc être modélisée et recrée virtuellement grâce à ce logiciel.

Le fonctionnement du logiciel comprend différentes étapes successives de traitement photographique (Agisoft LLC, 2017). Un alignement des photographies est dans un premier temps opéré. Le logiciel recherche sur l'ensemble des photographies les éléments communs et les fait correspondre ; les positions des photographies sont alors réajustées et calibrées. Il résulte de cette première étape la formation d'un nuage de points clairsemé, qui sont agencés et calibrés entre eux. Le logiciel crée ensuite un nuage de points dense, plus précis, basé sur les positions relatives des photographies. Enfin, un maillage 3D permet de représenter la surface d'intérêt : un ensemble de polygones est assemblé sur base du nuage de points pour constituer le modèle 3D.

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) peut être directement généré sur base d'un nuage dense de points ou sur base du maillage 3D. Un MNT est une représentation numérique de l'élévation de la surface terrestre : l'altitude est donc connue en chaque point du modèle. Des résultats plus précis sont observés lorsque le MNT est créé à partir du nuage dense de point. Une remarque importante est à prendre en considération : le logiciel *Agisoft PhotoScan* ne peut générer de MNT que si l'information apportée est géoréférencée.

Concrètement, il s'agit donc de prendre des photos aériennes d'une parcelle travaillée par le combiné de semis ERuiStop, ainsi que des points GPS pour référencer les images. Ces informations sont alors traitées dans le logiciel *Agisoft PhotoScan* afin d'en extraire un MNT représentatif qui est alors utilisé pour répondre aux deux objectifs posés.

4.2.2. Sites étudiés

Deux sites ont été étudiés. Le premier a servi principalement à se familiariser avec la méthodologie et à se fournir un premier résultat. Le second site a permis d'effectuer des répétitions supplémentaires permettant d'appuyer ou non le premier résultat.

La première parcelle d'étude se situe à Jurbise (Province du Hainaut), plus particulièrement à côté de l'usine LSM DF où le rouleau antiérosif a été façonné (une carte montrant avec plus de précision l'emplacement de la parcelle se situe en annexe 8.5). La parcelle agricole jouxtant l'usine a été travaillée avec le combiné de semis le mercredi 4 avril 2018 et la prise de mesures en tant que telle s'est effectuée le vendredi 6 avril 2018. Le temps était sec et ensoleillé.

Un second essai a été effectué en trois points d'une même parcelle à Marbaix, et la prise de mesures s'est effectuée le mardi 8 mai 2018, quelques jours après le passage du rouleau. Les conditions étaient similaires : temps sec et ensoleillé (Fig. 18).



Figure 18: Parcelles de Jurbise (gauche) et Marbaix (droite).

4.2.3. Acquisition des données et dispositif expérimental

Afin de caractériser en trois dimensions les dépressions créées par le rouleau, des photographies aériennes de la parcelle sont prises pour être traitées dans le logiciel *Agisoft PhotoScan*. L'appareil photo utilisé est un *Pentax K-30* et ses informations pratiques sont reprises dans le tableau 9. Les photos sont prises à une hauteur de 2 m grâce à une canne adaptée. Afin de s'assurer que les photos soient parallèles à la surface du sol, un niveau a été installé sur la canne.

Tableau 9: Propriétés de l'appareil photo utilisé (Pentax K-30)

<i>Resolution [pixels]</i>	<i>Focal Length [mm]</i>	<i>Pixel Size [μm]</i>
2688 x 1792	18	8.93 x 8.93

En pratique, une trentaine de photographies ont été prises pour chaque essai, sur une surface de 30 m² environ. Le but est d'obtenir une portion représentative du terrain, comportant un nombre suffisant de dépressions. Il est important qu'un certain recouvrement entre les différentes photos soit observé, afin que le logiciel *Agisoft PhotoScan* puisse les aligner correctement (Fig. 79, annexe 8.5).

Des objets facilement reconnaissables appelés GCP (*Ground Control Points*) sont placés à divers endroits de la parcelle. Les 7 objets (6 bics et 1 latte) sont disposés de sorte à délimiter la zone d'étude, et leur position géographique est enregistrée grâce à un GPS *Leica*. Afin d'assurer une précision maximale, le GPS est connecté au réseau WALCORS (Wallonie Continuously Operating Reference System), assurant aux GCP une précision de l'ordre du centimètre (Région wallonne, s.d.).

Les photographies aériennes sont importées dans *Agisoft PhotoScan*. Les GCP sont détectés et marqués sur celles-ci, et leurs coordonnées sont encodées dans le logiciel. L'ensemble des étapes de traitement du logiciel présentées plus haut sont alors exécutées et le MNT peut être généré (Fig. 19). Une orthophoto peut éventuellement être extraite (Fig. 80, annexe 8.5) afin de vérifier visuellement si la modélisation de la parcelle s'est correctement effectuée ou encore de détecter d'éventuels bugs, moins visibles sur un MNT.

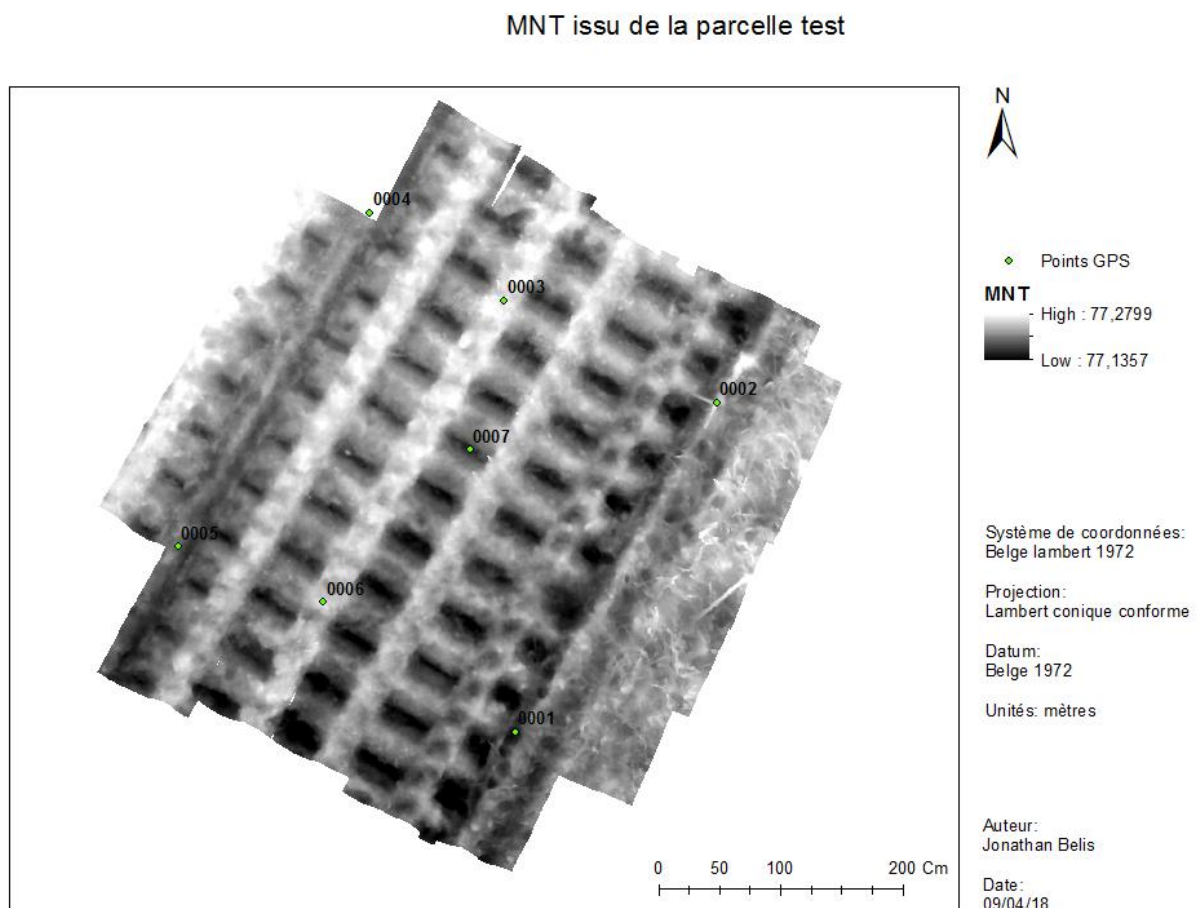


Figure 19: MNT issu de l'essai de Jurbise ; généré par Agisoft PhotoScan. Les 7 points GPS (points verts) correspondent aux emplacements des 7 GCP.

4.2.4. Modifications du MNT pour la simulation

Afin de déterminer le plus précisément possible la capacité de rétention des dépressions, deux modifications sont apportées au MNT avant de simuler l'algorithme de remplissage. La première rectification a pour but de mettre le MNT à plat, en lui soustrayant sa pente. Ainsi, un gradient au choix pourra être appliqué au MNT, afin de simuler l'effet de la pente sur la capacité de rétention des dépressions.

Pour ce faire, le MNT est importé dans le logiciel *MATLAB* et apparaît alors comme un nuage de points en 3D (coordonnées *X,Y* et altitude *Z*) pour lequel une régression linéaire dans un plan peut être calculée. Le plan estimé correspond au gradient de pente de la parcelle (Fig. 20) et peut être converti en fichier raster, observable dans le logiciel *ArcMap* (Fig. 21). Une attention particulière doit être portée au point suivant : *quand on sauve les valeurs de la matrice (en .csv) pour pouvoir, via un code python, les transformer en fichier raster, la fonction 'csvwrite' ne prend en compte que 5 chiffres significatifs lors de la sauvegarde. Dès lors, les valeurs d'altitude incluses dans le MNT détermineront à quel point le raster sera lisse et donc le gradient de pente. Le MNT de Jurbise étant haut de 70.2 m, on aura 3 chiffres après la virgule. Le MNT de Marbaix est haut 134.2 m, on n'observe donc plus que 2 chiffres après la virgule. On a besoin d'utiliser la commande 'dlmwrite' qui permet d'augmenter le nombre de chiffres significatifs et ainsi procurer un meilleur lissage du gradient.*

Pour soustraire ce gradient au MNT, le logiciel *ArcMap* possède un outil, le *raster calculator*, permettant d'effectuer des opérations mathématiques sur des fichiers raster. Le plan estimé dans *MATLAB* est donc converti en fichier raster et est soustrait au MNT dans *ArcMap*. Il en résulte un nouveau MNT pour lequel la pente peut être considérée comme nulle (Fig. 22).

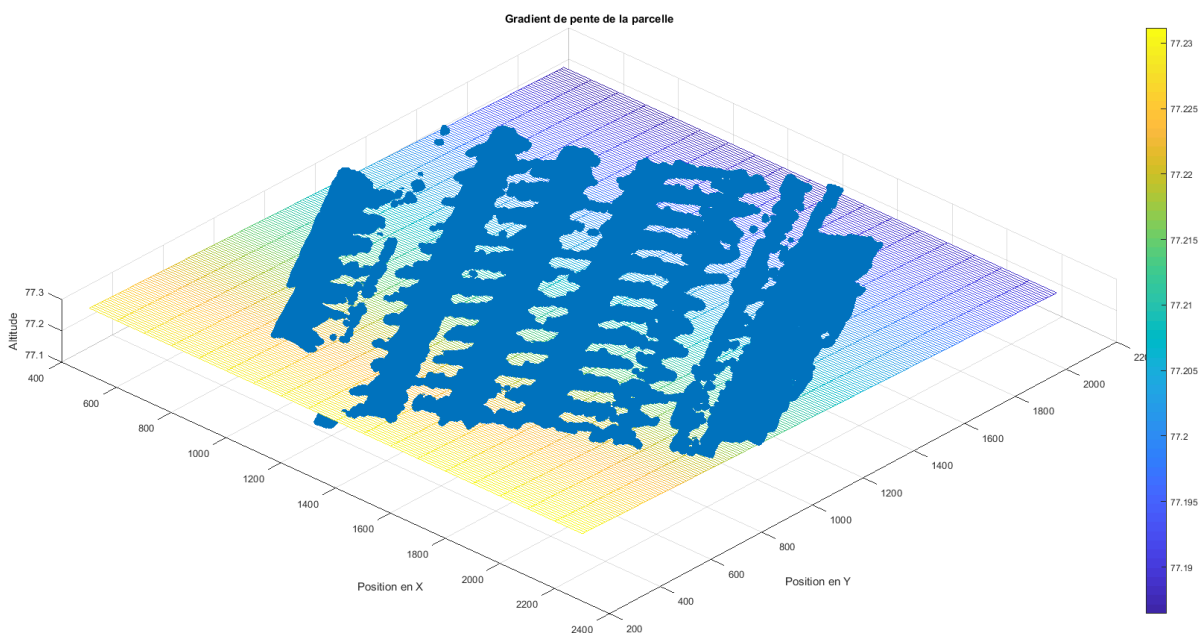
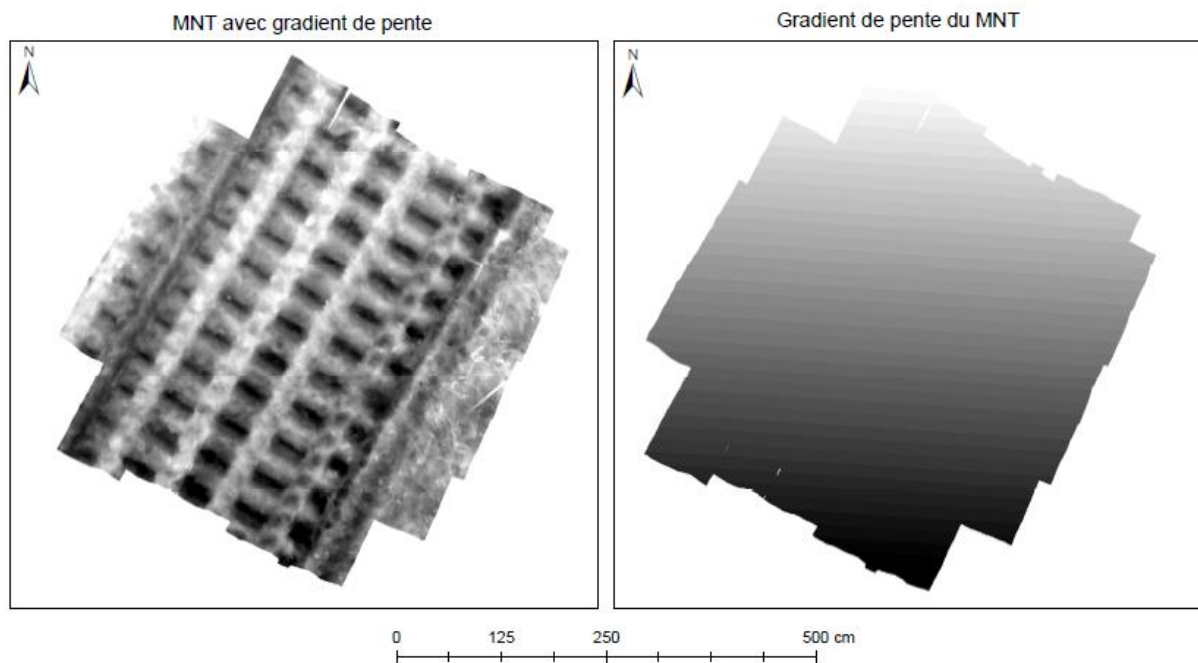


Figure 20: Régression linéaire du MNT de Jurbise. Le plan correspond au gradient de pente.

Obtention du gradient de pente du MNT



Système de coordonnées:
Belge Lambert 1972

Projection:
Lambert conique conforme

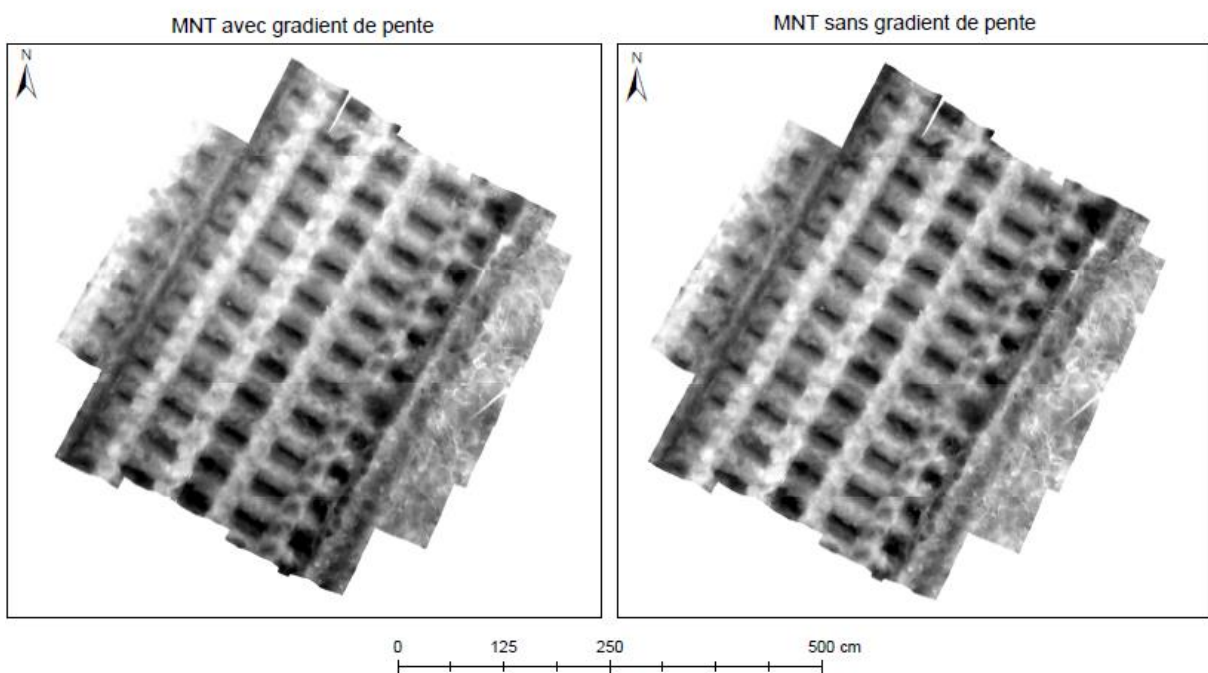
Datum:
Belge 1972

Auteur:
Jonathan Belis

Date:
25/04/18

Figure 21: Affichage du gradient de pente dans ArcMap.

Suppression du gradient de pente du MNT



Système de coordonnées:
Belge Lambert 1972

Projection:
Lambert conique conforme

Datum:
Belge 1972

Auteur:
Jonathan Belis

Date:
25/04/18

Figure 22: Comparaison entre les MNT de Jurbise avec et sans gradient de pente.

Une seconde rectification est ensuite apportée, dans le but d'obtenir un MNT pour lequel le sens de passage du combiné de semis ERuiStop (et donc l'alignement des dépressions créées) est parallèle au sens d'écoulement de l'eau. Ainsi, lorsque l'algorithme calcule la capacité de rétention sur le MNT, l'eau s'écoule vers un exutoire fictif qui correspond au bas du MNT.

Dans MATLAB, les MNT de Jurbise et de Marbaix sont pivotés respectivement d'un angle de -30.5° et -31.5° (sens anti horloger). Une troisième et dernière opération est finalement effectuée : le MNT est rogné pour obtenir une surface représentative de la parcelle (Fig. 23).

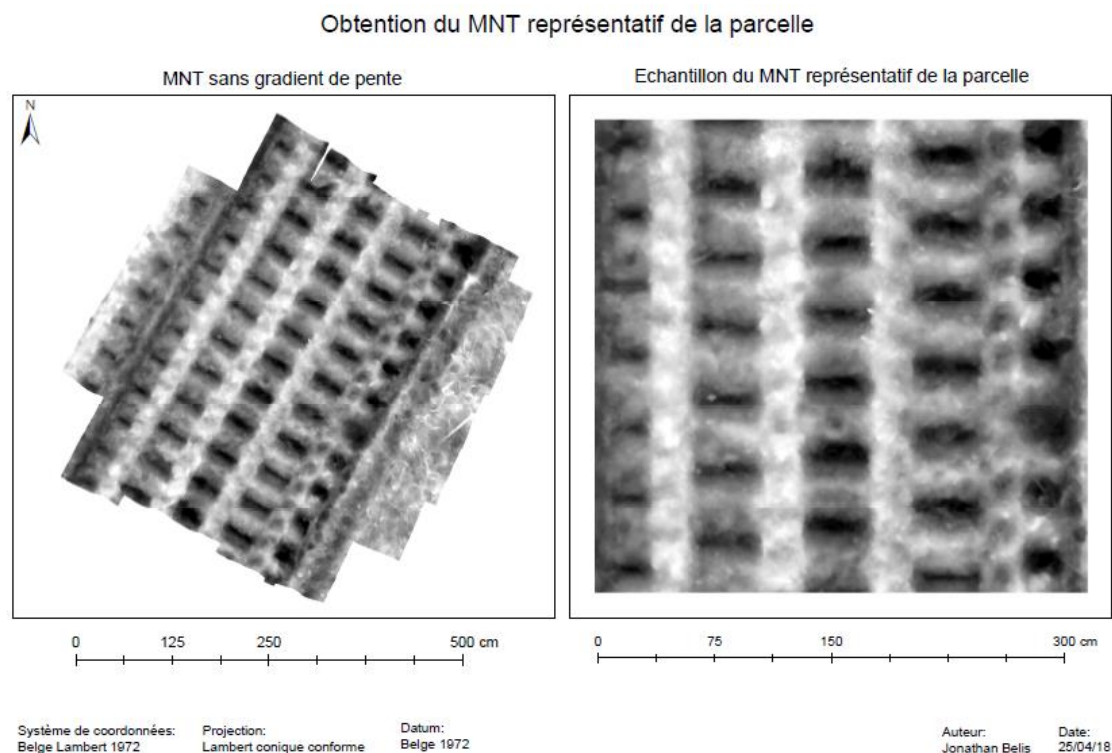


Figure 23: Visualisation de la rotation et du découpage du MNT de Jurbise.

Chaque MNT ainsi obtenu est donc à plat, rogné et possède son exutoire en bas des motifs (Fig. 24). On remarque des valeurs négatives sur l'échelle pour les points les plus faibles, ce qui n'a pas de sens. Ceci est dû au retrait du gradient de pente, qui engendre des valeurs négatives en certains points du MNT. Pour la suite des calculs, l'ensemble des points du MNT sont rehaussés par la valeur la plus faible observée, soit 0.071962 m pour le MNT de Jurbise pris pour exemple. Ainsi, la valeur la plus faible observée a une hauteur de 0 m et l'ensemble des valeurs prises par le MNT sont positives et cohérentes.

Une fois le MNT représentatif obtenu, il est traité dans MATLAB afin de modifier la pente pour observer les différents résultats relatifs. Une matrice de même taille que le MNT d'intérêt et représentant un gradient de pente souhaité est alors créée. Il suffit d'additionner ces deux matrices pour obtenir le MNT présentant la pente désirée. Cette étape cause une légère distorsion, négligeable pour les gradients souhaités. Pour une culture de maïs, il est intéressant d'observer des résultats pour des pentes allant jusqu'à 20%, cas le plus extrême. Pour chaque essai, cinq MNT sont *in fine* générés pour des pentes allant de 0 à 20%, par pas de 5%.

MNT représentatif de la parcelle

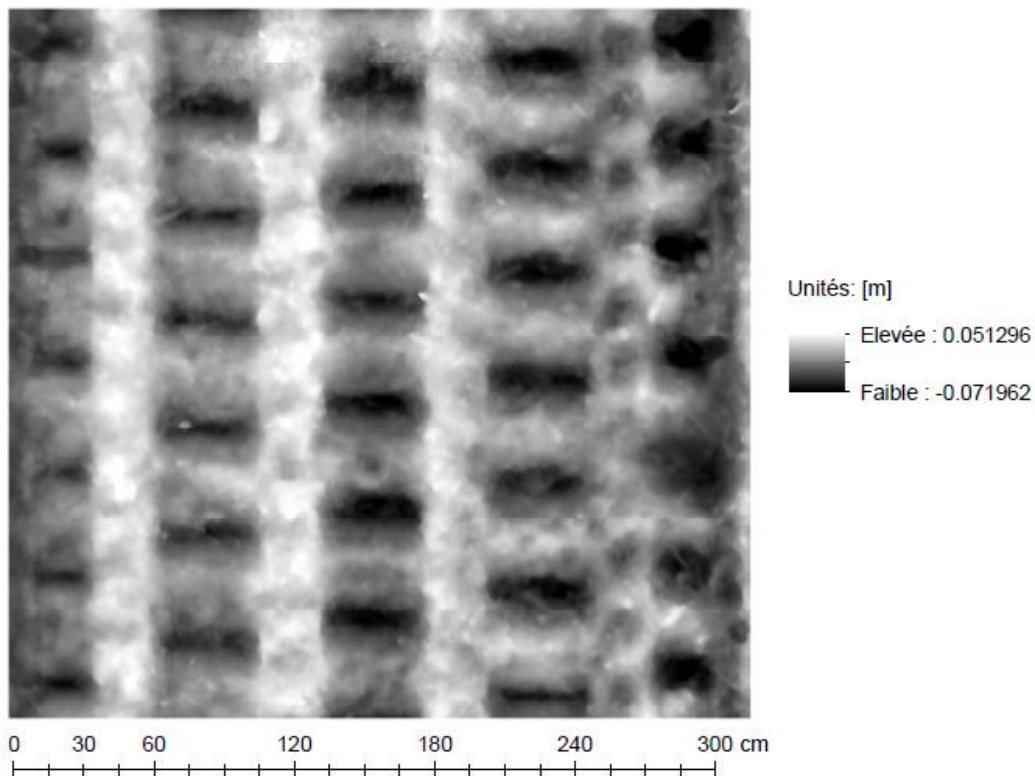


Figure 24: MNT final de Jurbise, obtenu suite aux différentes manipulations MATLAB, et prêt à être utilisé pour les simulations.

4.2.5. Algorithme de remplissage et connectivité hydrologique

Antoine *et al.* (2009) proposent un algorithme permettant de calculer la capacité de rétention des dépressions sur une parcelle (D_s) ainsi que la connectivité hydrologique. La connectivité hydrologique est un facteur informant sur le caractère ruisselant d'une parcelle et son comportement hydrologique (Antoine *et al.*, 2009). Elle caractérise les liens internes (la connexion) entre les eaux de ruissellement provenant de la partie amont de la parcelle et les eaux réceptrices en aval de celle-ci, au niveau de l'exutoire (Croke *et al.*, 2005). Au plus la connectivité hydrologique est importante, au plus du ruissellement sera observé. Selon l'intensité et la durée de la pluie, cette connexion sera établie plus ou moins rapidement, tout comme le ruissellement (Bracken and Croke, 2007).

L'algorithme de remplissage, fourni au sein d'un script codé en *fortran* par Andrés Peñuela (Peñuela *et al.*, 2015), est utilisé pour déterminer la capacité de rétention des dépressions créées par le combiné de semis ERuiStop. Afin de prendre en considération les effets du relief, un modèle, basé sur un automate cellulaire, a été utilisé. Un algorithme de remplissage va donc permettre de calculer de façon simplifiée les écoulements de l'eau et générer des hydrogrammes, de la même manière que celle expliquée par Hairsine *et al.* (1992) (*cfr.* Fig. 3, §2.5.1).

Algorithme de remplissage

La façon dont l'algorithme calcule le stockage de surface est expliquée par Antoine *et al.* (2009) de la manière suivante. A partir d'une intensité de pluie I [m/s], pour une surface donnée S [m²], pendant un intervalle de temps donné Δt [s], un faible volume d'eau $\Delta V = SI\Delta t$ [m³] est distribué uniformément sur la surface.

Le volume d'eau par pixel ΔV_{ij} est tel que $\Delta V_{ij} = \Delta V / \#pixels$.

Chaque ΔV_{ij} se déplace immédiatement vers le point le plus bas qu'il peut atteindre, suivant le gradient absolu de pente, c'est-à-dire en tenant compte du relief mais également de l'épaisseur de la lame d'eau. Les volumes ΔV_{ij} , là où ils s'accumulent, sont donc ajoutés au ΔV_{ij} précédent, contribuant à augmenter l'épaisseur de la lame d'eau. Les dépressions se remplissent ainsi jusqu'à ce qu'elles débordent. A ce moment, l'eau en excès coule plus loin, suivant le gradient. Lorsque toute l'eau - tous les ΔV_{ij} - est allouée sur la parcelle, la simulation génère un nouveau Δt pendant lequel un nouveau volume d'eau ΔV est ajouté.

L'organigramme ci-dessous (Fig. 25) permet de visualiser la logique derrière l'algorithme proposé par Antoine *et al.* (2009).

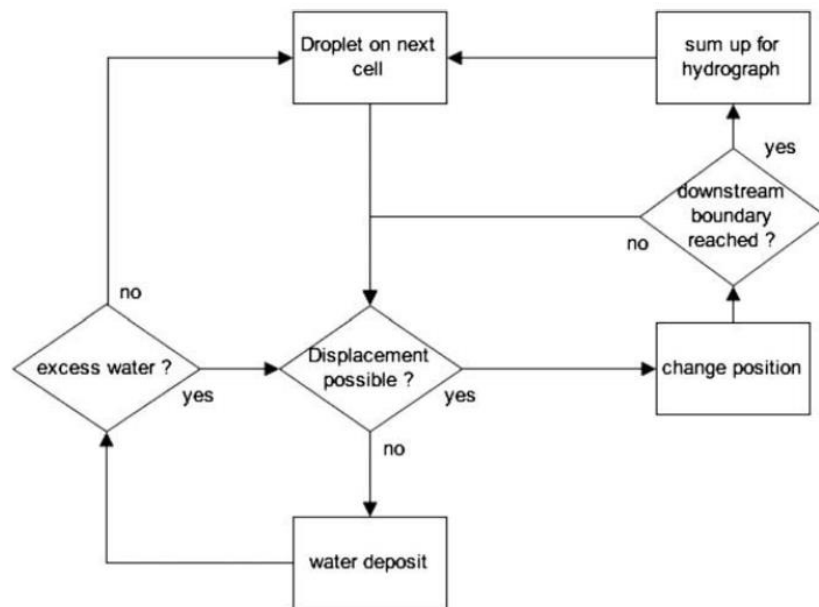


Figure 25: Organigramme des processus de l'algorithme de remplissage (Antoine *et al.*, 2009).

En pratique, l'algorithme simule un apport d'eau sur le MNT. En suivant le relief, l'eau rejoint le point le plus bas qu'il lui est possible d'atteindre. L'eau peut alors soit stagner dans une dépression, soit être évacuée du MNT s'il existe un chemin d'écoulement continu entre ce point et l'exutoire. Lorsque tout le relief est comblé par de l'eau, l'algorithme considère que la capacité de rétention maximale est atteinte : plus aucune goutte d'eau n'est capable d'être stockée dans le relief et l'entièreté de celle-ci ruisselle jusqu'à l'exutoire. L'algorithme cesse alors de tourner.

Le graphe suivant (Fig. 26) représente l'évolution des différents paramètres et variables utilisés dans l'algorithme de remplissage. Un exemple est présenté pour le site du Jurbise.

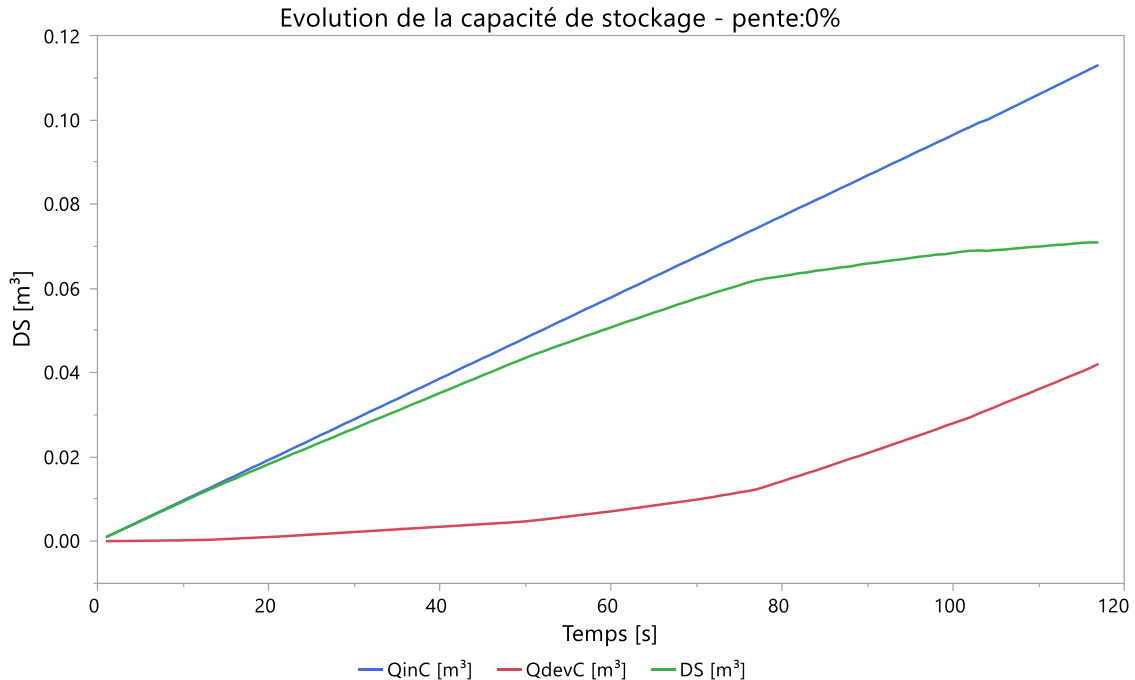


Figure 26: Visualisation du fonctionnement de l'algorithme : calcul de la capacité de rétention.

- Q_{inC} [m³] = apport d'eau, constant, tout le long de la simulation.
- Q_{devC} [m³] = quantité totale d'eau évacuée par l'exutoire au cours de la simulation.
- DS [m³] = capacité de rétention des dépressions D_s (introduite au §2.5.1) et se calcule en faisant directement la différence entre les deux variables citées ci-dessus :

$$DS = Q_{inC} - Q_{devC}$$

L'allure des courbes est facilement interprétée. Les volumes d'eau dV apportés à chaque moment dt sont tous identiques ; Q_{inC} croît donc de façon constante dans le temps. La quantité d'eau évacuée Q_{devC} est initialement nulle car l'eau apportée sur la parcelle comble les dépressions. Au fur et à mesure, celles-ci vont se remplir, dirigeant une part de plus en plus importante de l'eau vers l'exutoire. La capacité de rétention D_s suit une tendance inverse : au début, toute l'eau apportée est stockée. Au plus les dépressions vont se remplir, au moins elles seront capables d'accepter de l'eau supplémentaire. Au bout d'un certain cumul de pluie, la capacité de stockage maximale est atteinte.

Cet algorithme a donc in fine été utilisé pour chacun des MNT générés précédemment. Notons que le format des MNT (.tif) a dû être converti au format .txt pour que ceux-ci puissent être exploitables dans le script fortran.

Limites de l'algorithme

L'algorithme ne tient pas compte du temps de transfert de l'eau car la vitesse de l'eau est, par hypothèse dans le modèle, considérée comme infinie. Il est important d'également souligner que l'algorithme ne considère pas l'infiltration. Cela revient alors à simuler une pluie dont l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration du sol pour un taux d'infiltration supposé

constant et homogène (Peñuela *et al.*, 2016). Ensuite, l'algorithme calcule le D_s , ignorant la détention superficielle S_d . Les volumes qui en résultent ne correspondent donc pas au stockage de surface total. Enfin, la méthode sous-entend que les dépressions sont vides quand on commence les calculs.

Connectivité hydrologique

Sur base des résultats de l'algorithme et connaissant le degré de remplissage des dépressions, il est possible à n'importe quel moment de connaître la surface de la parcelle qui est hydrauliquement connectée à l'exutoire (Peñuela *et al.*, 2015). Le ratio de la surface connectée par la surface totale peut alors être exprimé en fonction de la capacité de rétention des dépressions du sol. Cette fonction définie par Antoine *et al.* (2009) est appelée fonction de connectivité de surface relative (*RSCf: Relative Surface Connection function*) et sert d'indicateur de la connectivité de surface (Fig. 27). Pour faciliter les comparaisons entre résultats, Peñuela *et al.* (2015) suggèrent de normaliser cette fonction où une nouvelle variable, le *Relative Depression Storage*, est introduite :

$$RDS = DS / DS_{max}$$

- RDS = *Relative Depression Storage* : capacité de rétention maximale normalisée [m^3/m^3] ;
- DS_{max} = *Maximum Depression Storage* : capacité de rétention maximale des dépressions [m^3].

Le RDS varie entre 0 et 1. Lorsqu'il est nul, cela signifie que la connectivité hydrologique est nulle. Lorsqu'il est maximum et égal à 1, la totalité de la surface est connectée à l'exutoire : toute l'eau s'écoule directement vers l'exutoire, ne pouvant stagner nulle part sur la parcelle. L'ensemble du microrelief est donc saturé.

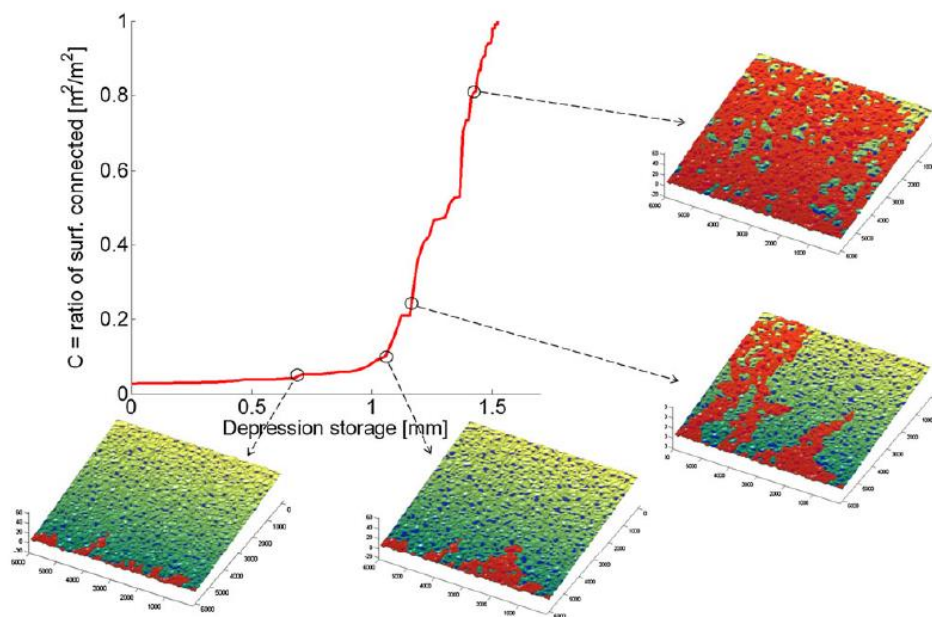


Figure 27: *Relative Surface Connection function (RSCf) et visualisation de la connectivité : la surface connectée à l'exutoire de la parcelle est représentée en rouge (Peñuela et al., 2016).*

4.2.6. Estimation de l'erreur sur la photogrammétrie

Afin d'estimer l'erreur commise par le logiciel sur la hauteur réelle du relief, différents objets dont la taille est connue sont photographiés et modélisés dans celui-ci. Connaissant avec précision la hauteur des objets, celle-ci pourra être comparée avec la hauteur relative observée sur le MNT généré par le programme.

Dix boulons ainsi que dix embouts en caoutchouc ont été éparpillés sur une surface de 5 m de longueur sur 4 m de largeur. Trois autres objets, plus « volumineux », ont également été placés sur la zone dans le cas où les boulons et/ou embouts se verraient trop petits. Leurs dimensions respectives, mesurées au pied à coulisse électronique, sont reprises dans le tableau 10. Les objets ainsi que l'ensemble du dispositif expérimental peuvent être visualisés en annexe 8.11. Notons que les conditions de terrain ont été mises en place de sorte à être représentatives des conditions dans lesquelles les MNT de Jurbise et de Marbaix ont été générés : superficie équivalente, GCP placés à des endroits similaires, et photographies prises à une même hauteur de 2 m.

Tableau 10: Dimensions des différents objets utilisés pour l'estimation de l'erreur sur la photogrammétrie

	Boulon (x10)	Embout en caoutchouc (x10)	Carré plat (x1)	Petit cylindre (x1)	Grand cylindre (x1)
Hauteur [cm]	1.17	3.04	1.00	2.96	6.03
Diamètre/ Largeur [cm]	1.69	2.00	4.23	4.00	7.98

5. Résultats et discussion

Cette partie présente l'ensemble des résultats relatifs au double objectif posé antérieurement. Tout d'abord, l'ensemble des résultats liés à l'analyse des pluies et des données du projet ERUISTOP sont présentés. Les différents CN associés aux parcelles étudiées sont ensuite représentés graphiquement. Tous les résultats liés à l'étude des dépressions sont finalement présentés.

5.1. Analyses de la pluviométrie

Une première section permet d'afficher d'une part l'ensemble des cumuls de pluie liés aux essais du CIPF mais également provenant de la station PAMESEB. D'autre part, la série temporelle d'Ottignies est présentée. Celle-ci montre les pluies journalières et leur intensité maximale pour les 5 années d'étude à Ottignies.

5.1.1. Pluviométrie et génération de la série temporelle d'Ottignies

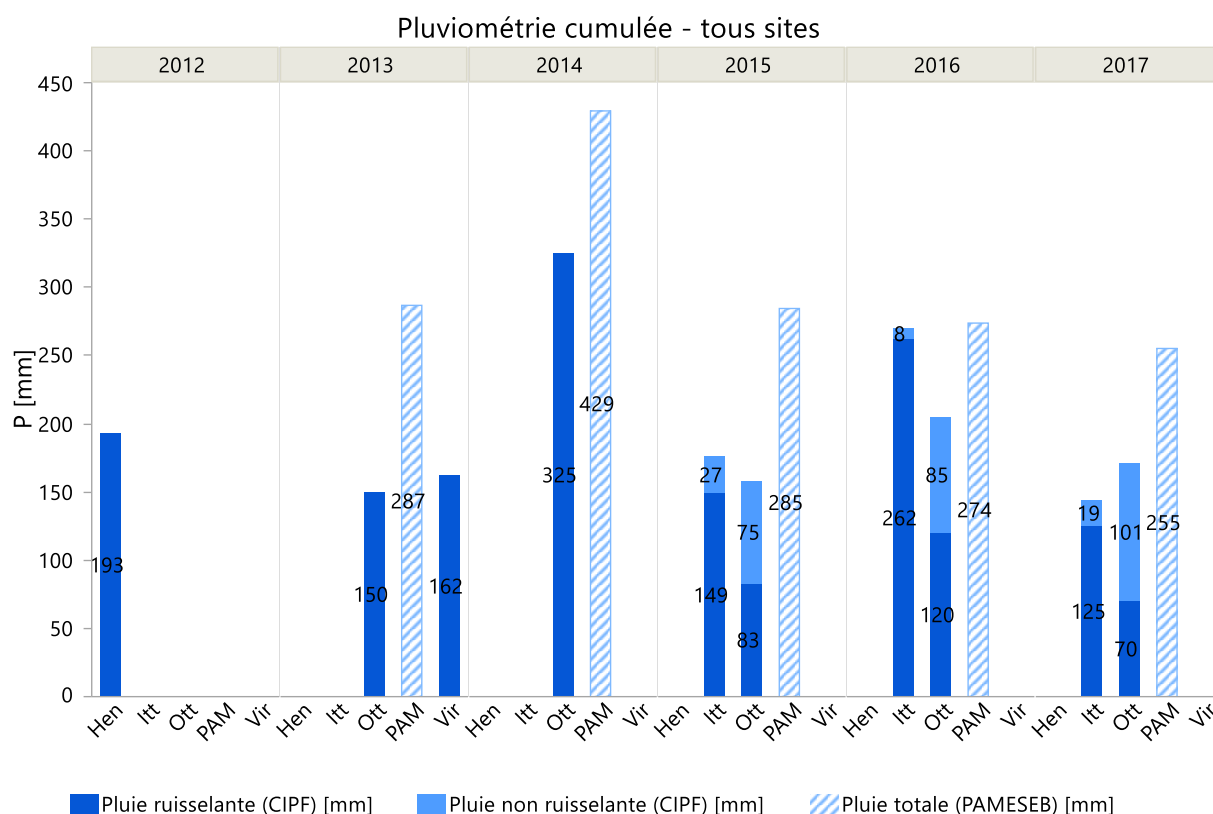


Figure 28: Comparaison entre la pluviométrie cumulée sur la saison culturale (PAMESEB) et la pluviométrie cumulée recensée par le CIPF, par site, distinguant pluies ruisselantes et non ruisselantes. Le nombre sur chaque histogramme indique la valeur précise de pluviométrie associée aux pluies ruisselantes et non ruisselantes.

Comme expliqué au §4.1.4.1, les pluies dites *ruisselantes* sont distinguées de celles dites *non ruisselantes*. Le graphe ci-dessus montre la décomposition de la pluviométrie en pluies ruisselantes et non ruisselantes, et leur proportion sur la saison (Fig. 28).

La pluie totale, issue des données PAMESEB, permet de se faire une idée quant à la quantité de pluie totale que l'on peut observer sur une saison culturale. Le cumul total du CIPF n'atteint jamais des ordres de grandeurs pareils (250-300 mm) pour deux raisons. D'une part, les cumuls n'ont pas été recensés dès le semis ; d'autre part comme expliqué au §4.1.4.1, les pluies non ruisselantes n'étaient pas toujours recensées.

La série temporelle générée sur base des données de la PAMESEB est représentée à la figure suivante (fig. 29). On y observe, pour chaque saison culturale, les pluies journalières depuis 2013 jusqu'à 2017. La figure 30 permet quant à elle de visualiser les intensités maximales observées chaque jour, pour les mêmes périodes. La visualisation des pluies couplées à leur intensité maximale permet de mieux comprendre les valeurs de ruissellement et de pertes en terre mesurées.

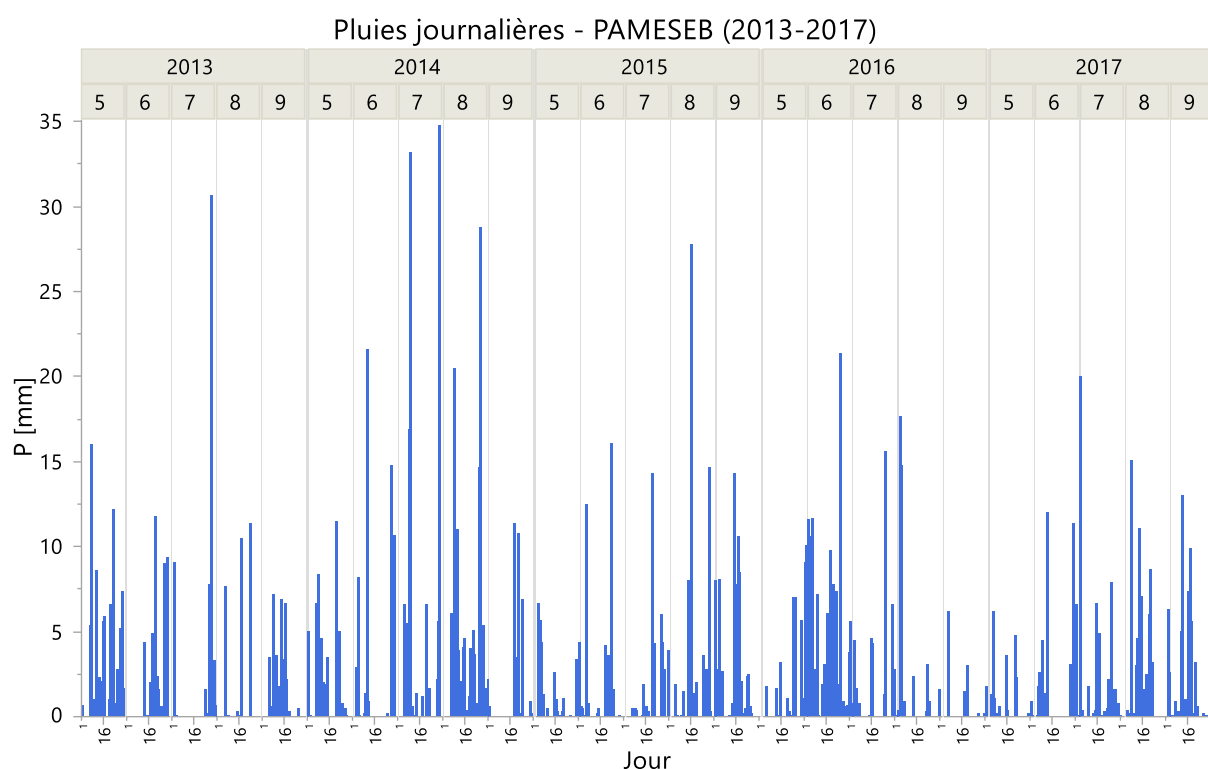


Figure 29: Série temporelle d'Ottignies - Pluies journalières (PAMESEB). Les nombres 5 à 9 représentent les mois de l'année.

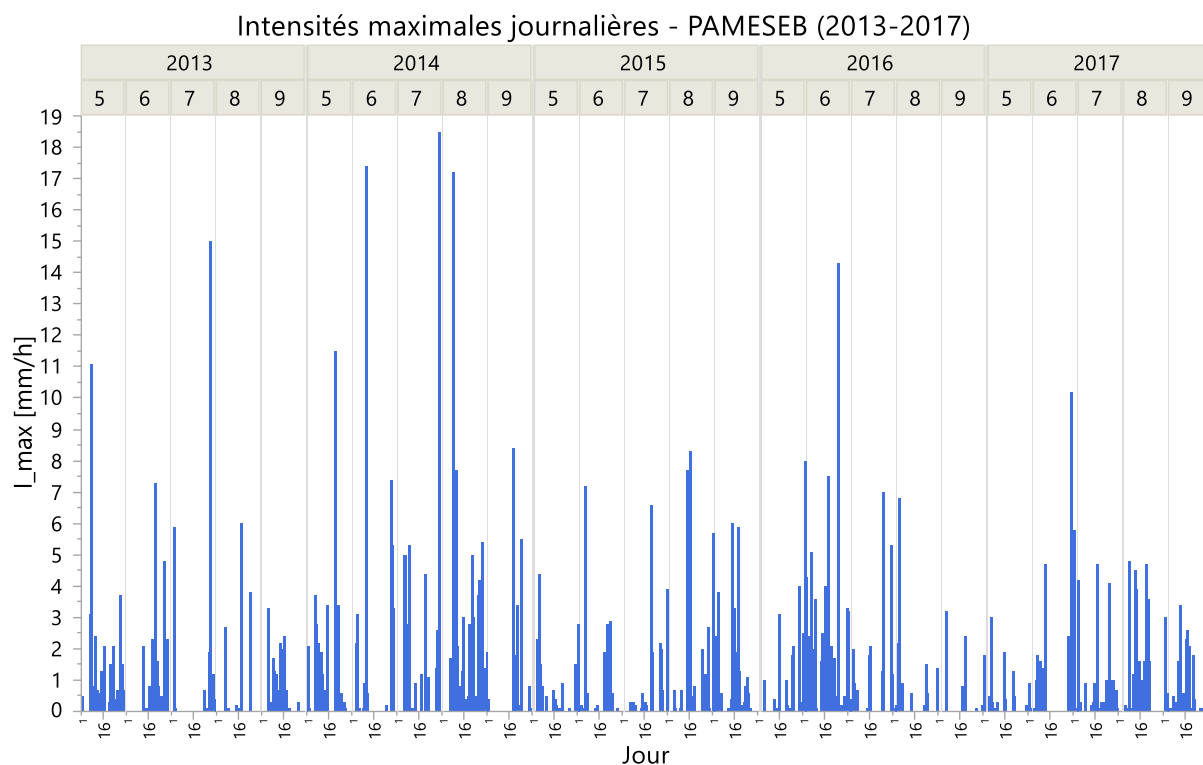


Figure 30 : Série temporelle d'Ottignies - Intensités maximales journalières. Les nombres 5 à 9 représentent les mois de l'année.

5.1.2. Probabilité d'observer du ruissellement

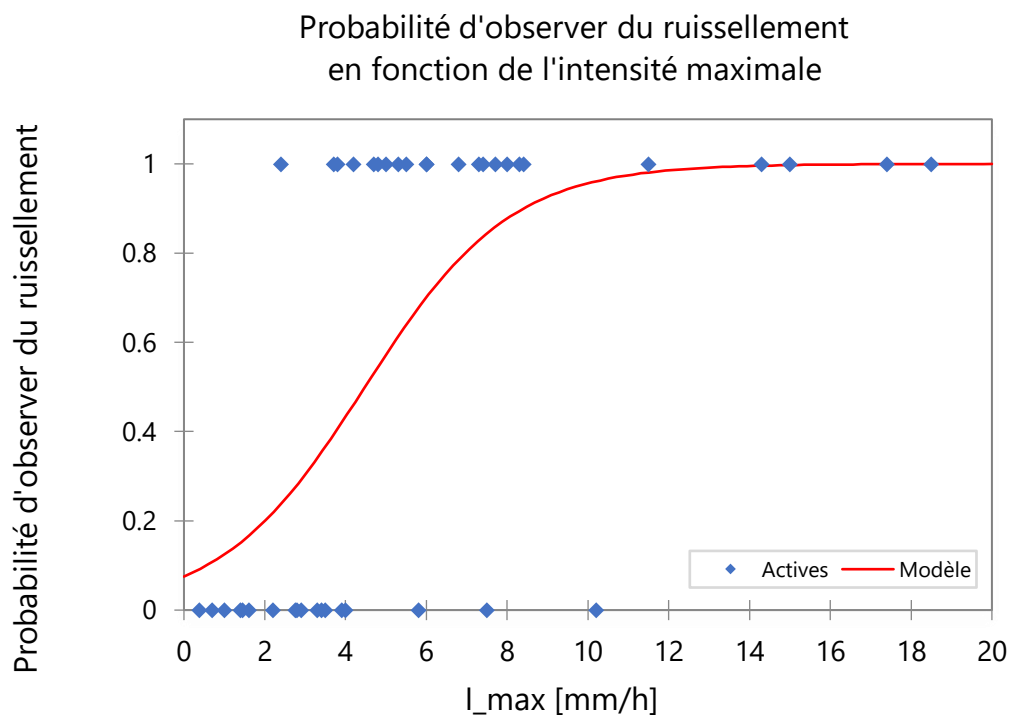


Figure 31: Régression logistique servant à estimer la probabilité d'observer du ruissellement selon l'intensité horaire maximale (Ottignies – PAMESEB). Les losanges bleus représentent les données utilisées pour effectuer la régression (droite rouge).

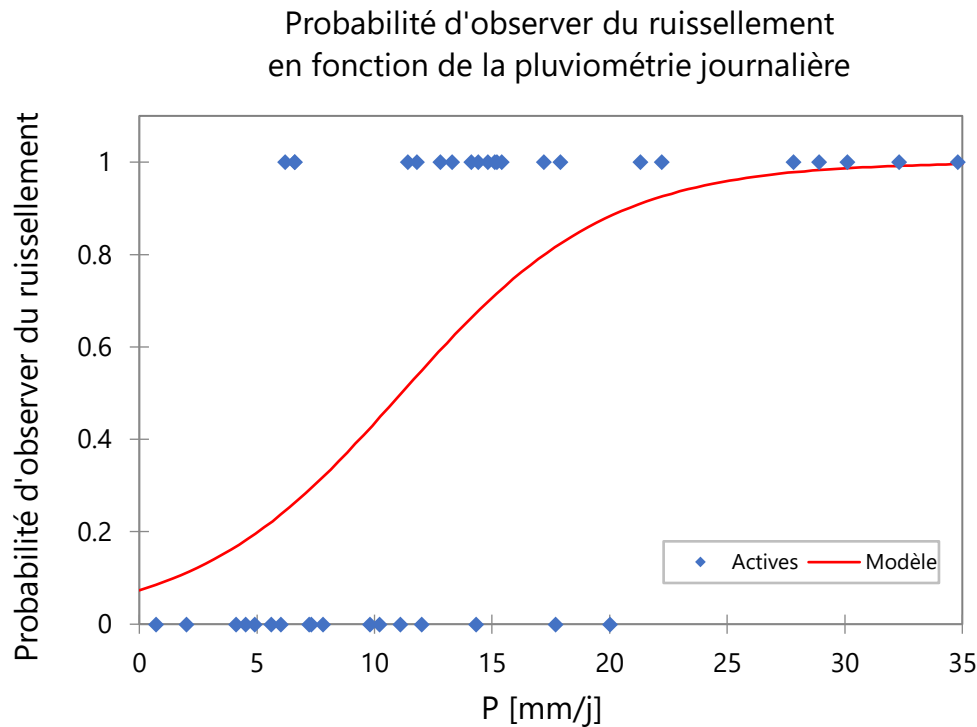


Figure 32: Régression logistique servant à estimer la probabilité d'observer du ruissellement selon la pluie journalière observée (Ottignies - PAMESEB). Les losanges bleus représentent les données utilisées pour effectuer la régression (droite rouge).

Les probabilités d'observer du ruissellement pour une intensité horaire maximale d'une part et selon la pluie journalière d'autre part sont déterminées d'après les régressions logistiques (Fig. 31 & 32). Le premier graphe nous indique qu'une intensité supérieure à 12 mm/h provoque d'office du ruissellement. Sur base du second graphe, on peut conclure qu'une pluie journalière supérieure à 30 mm/j déclenchera à coup sûr du ruissellement. A l'inverse, il y a peu de chance d'observer du ruissellement pour une pluie inférieure à 5 mm/j. Une pluie de 12 mm/j montre 50% de risque de ruissellement.

Les deux régressions présentées sont valables aussi bien pour le traitement Témoin que le traitement ERUISTOP. En effet, parmi les 41 données utilisées pour la régression (losanges bleus sur les 2 figures), seule une donnée présente du ruissellement pour le traitement Témoin et non pour le traitement ERUISTOP (*cfr.* Tab. 22, annexe 8.6). Dès lors, deux régressions distinctes pour ces deux traitements auraient présenté des résultats pratiquement identiques. Lorsque du ruissellement est observé pour le traitement Témoin, on en observe systématiquement pour le traitement ERUISTOP. Les probabilités d'observer du ruissellement pour les traitements Témoin et ERUISTOP sont donc les mêmes ; ce sont les volumes d'eau ruisselée qui seront différents et qui se verront largement réduits avec l'utilisation du combiné ERuiStop.

5.2. Analyse de l'efficacité du combiné ERuiStop

Cette partie expose l'ensemble des résultats liés à l'analyse des données de ruissellement et d'érosion du CIPF. Lorsque des mises en relation avec la pluviométrie sont effectuées, celle-ci correspond aux cumuls périodiques mesurés par le CIPF. Chacune de ces analyses se clôture par une discussion plus approfondie et synthétique.

5.2.1. Ruissellement : Résultats

5.2.1.1. Ottignies

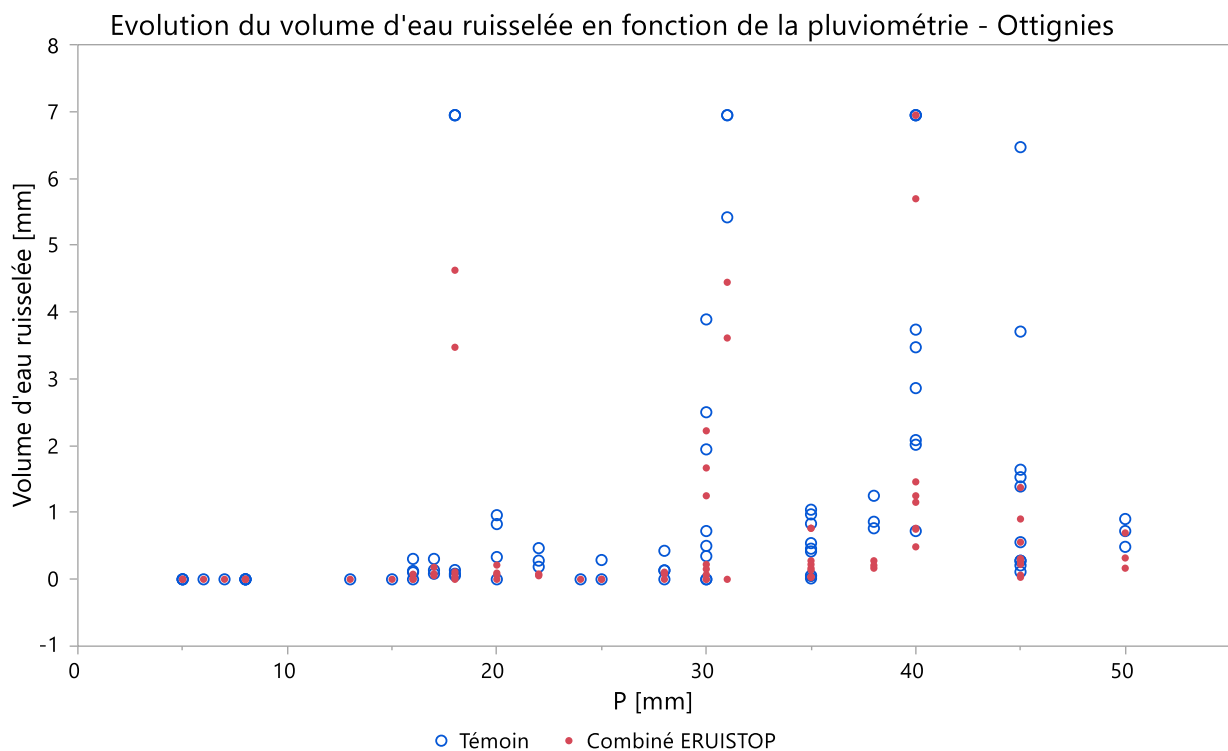


Figure 33: Volumes de ruissellement et pluies associées – Ottignies, 5 années. Données du CIPF. Trois valeurs de ruissellement, correspondant aux trois répétitions, sont mesurées pour chaque cumul pluviométrique.

On observe premièrement que le traitement ERUISTOP montre des volumes de ruissellement plus faibles que le Témoin, pour un même cumul périodique (Fig. 33). Aucun ruissellement n'est observé pour une pluie inférieure à 15 mm, traitements confondus. Sur base du graphe, on peut donc estimer le seuil de ruissellement pour ce site comme égal à 15 mm. Notons que la figure 32 nous indique que pour une telle pluie, il y a déjà 75% de chance d'observer du ruissellement.

On remarque que certaines valeurs de ruissellement sont bien plus élevées que d'autres, pouvant plafonner à une valeur avoisinant les 7 millimètres. Il s'agit en réalité d'une valeur de 6.944 L/m², qui correspond en pratique à 500 L/72m², soit la capacité maximale que peut contenir chaque bac de récolte. Pour tous ces points-là, les pluies ont fait déborder les bacs

de récolte ; le volume ruisselé est donc sous-évalué. Il est intéressant de regarder les intensités pour ces valeurs extrêmes. En regardant la série temporelle d'Ottignies (Fig 29 & 30), on s'aperçoit que les valeurs extrêmes sont principalement observées en 2014 pour ce site. En effet, l'été 2014 a été particulièrement humide, avec de nombreux orages dans le Brabant Wallon (RTBF, 2014). L'été 2014 a été considéré comme exceptionnel en termes de précipitations par l'IRM, avec des pluies de période de retour estimées à 30 ans, et 348.2 mm tombés sur la saison (IRM, 2018a). L'utilisation du combiné ERuiStop a toutefois permis de limiter les volumes de ruissellement pour ces événements.

On constate finalement sur le graphe que de nombreux cumuls périodiques présentent une pluviométrie importante, mais de faibles volumes de ruissellement. Il est évident que ces cumuls ont été recensés pour la plupart sur de longues périodes, et que les intensités devaient être très faibles. En liant cette fois les données de pluie de la PAMESEB avec les volumes de ruissellement, il est possible de recréer ce graphe, où l'intensité des pluies est désormais représentée. Ce graphe permet de confirmer l'importance de distinguer « cumul » et « intensité » pour l'interprétation des résultats. Dès lors, les événements de 2014 qui ont fait déborder les bacs de récolte sont clairement visibles, montrant des intensités allant jusque 18 mm/h (Fig. 34).

Notons que les cumuls périodiques de la PAMESEB se montrent parfois très importants, pouvant atteindre les 70 mm. Il est donc intéressant de visualiser ce même graphique en utilisant non plus les cumuls périodiques mais bien les pluies journalières déterminées dans le jeu de données PAMESEB, comme expliqué au §4.1.5. On observe désormais moins de larges cumuls pluviométriques présentant de faibles intensités sur le nouveau graphe (Fig.35). Le cumul le plus important représente ainsi une pluie journalière de 35 mm pour laquelle une intensité maximale de 20 mm/h a été recensée, ce qui semble cohérent avec ce qu'on peut observer en réalité.

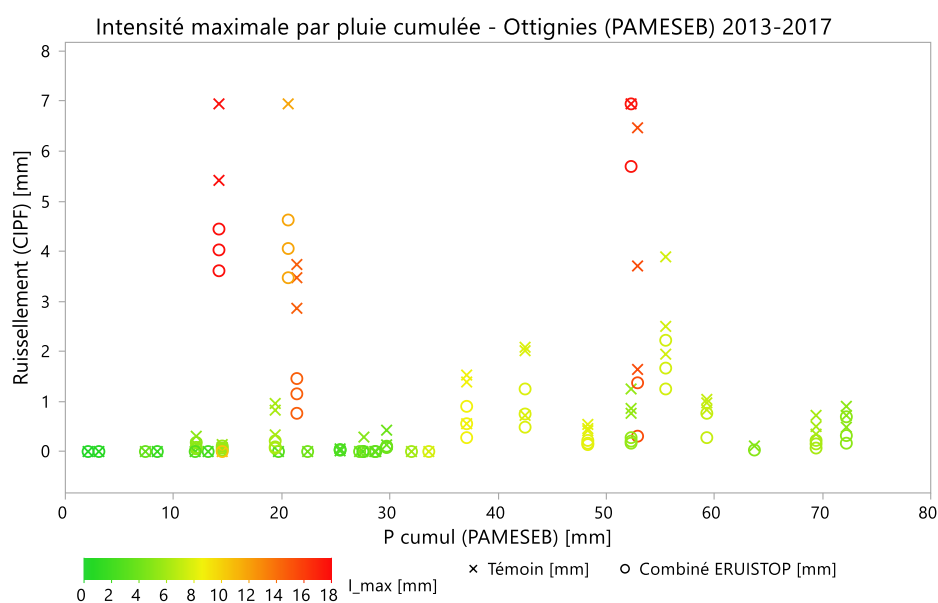


Figure 34: Visualisation du ruissellement mesuré par le CIPF, en fonction des cumuls périodiques de la PAMESEB et de leur intensité.

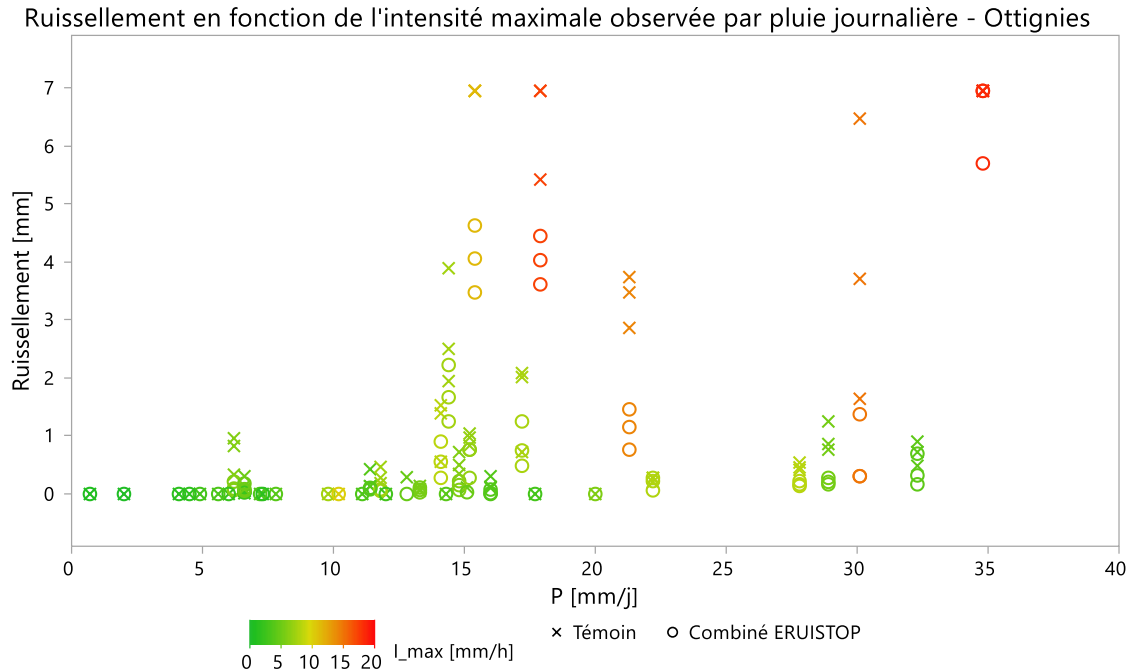


Figure 35: Visualisation du ruissellement mesuré par le CIPF, en fonction des pluies journalières de la PAMESEB et de leur intensité.

Sur base de la figure 35, on peut réestimer le SR pour le site d'Ottignies. Celui-ci se situerait entre 5 et 10 mm pour le traitement Témoins et serait retardé à 15 mm pour le traitement ERUISTOP. Ces valeurs semblent déjà plus en accord avec les probabilités d'observer du ruissellement, visualisées à la figure 32.

Notons que les données de la série temporelle PAMESEB permettent de visualiser le ruissellement selon la période de la saison culturale. On peut alors voir si plus de ruissellement surviendrait en début ou en fin de saison. Aucune conclusion ne peut cependant être tirée du graphe (Fig. 81), visible en annexe 8.7.

Les deux graphiques présentés à la page suivante informent sur les ruissellements cumulés et CR associés, par année (Fig. 36) mais également en moyenne pour les 5 années de données (Fig. 37). Les CR se voient dans l'ensemble relativement faibles, d'autant plus pour le traitement ERUISTOP. Les étés 2015 et 2017 montrent les CR les plus faibles, dépassant à peine 1% en 2015. Ces étés se sont effectivement montrés très secs, ce qui est confirmé par les figures 28 à 30. Les orages de 2014 sont à nouveau visibles sur la figure 36, montrant des cumuls et CR largement plus élevés que pour les essais effectués les autres années. Le traitement ERUISTOP se montre efficace dans tous les cas, avec une réduction de l'ordre de moitié du ruissellement (réduction de 51.2%) (Fig. 37).

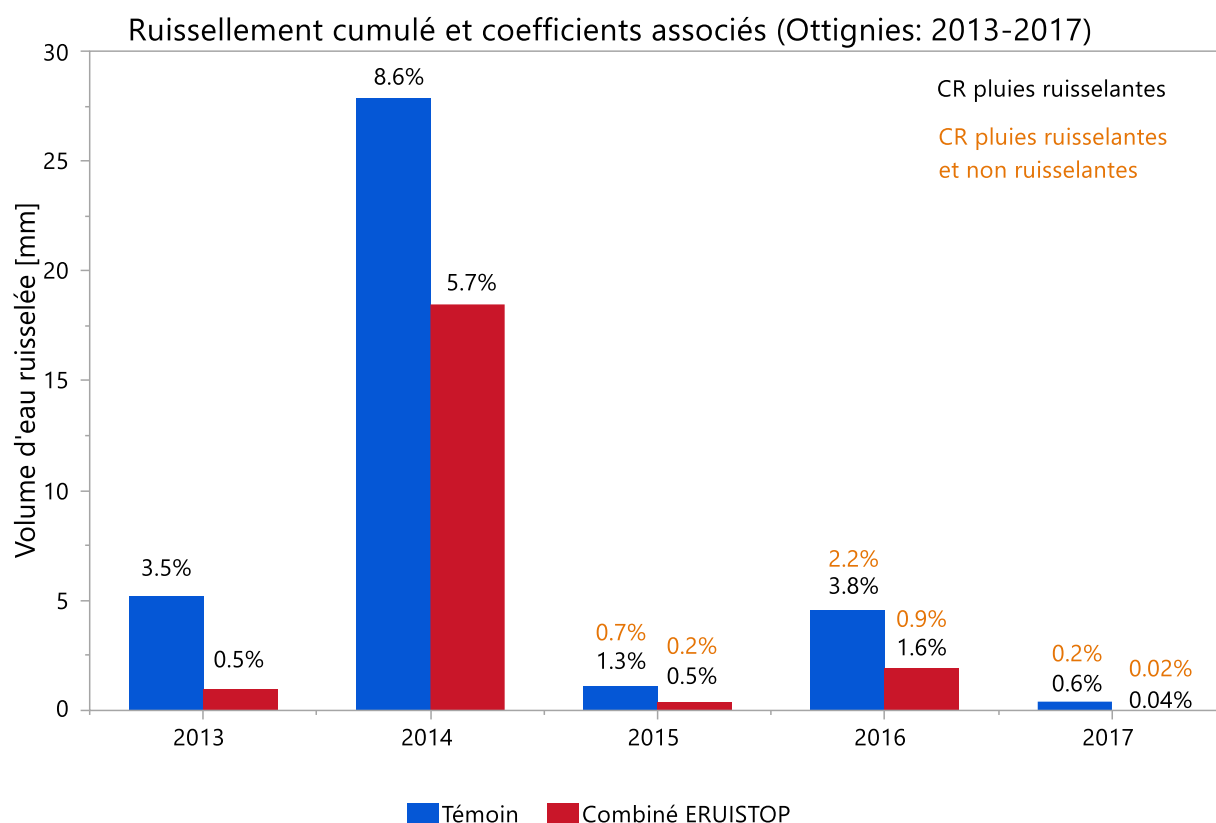


Figure 36: Ruissellement cumulé par saison et coefficients de ruissellement associés pour le site d'Ottignies, pour chaque année. En noir : CR pour pluies ruisselantes uniquement ; en orange : CR pour les pluies totales. Une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP.

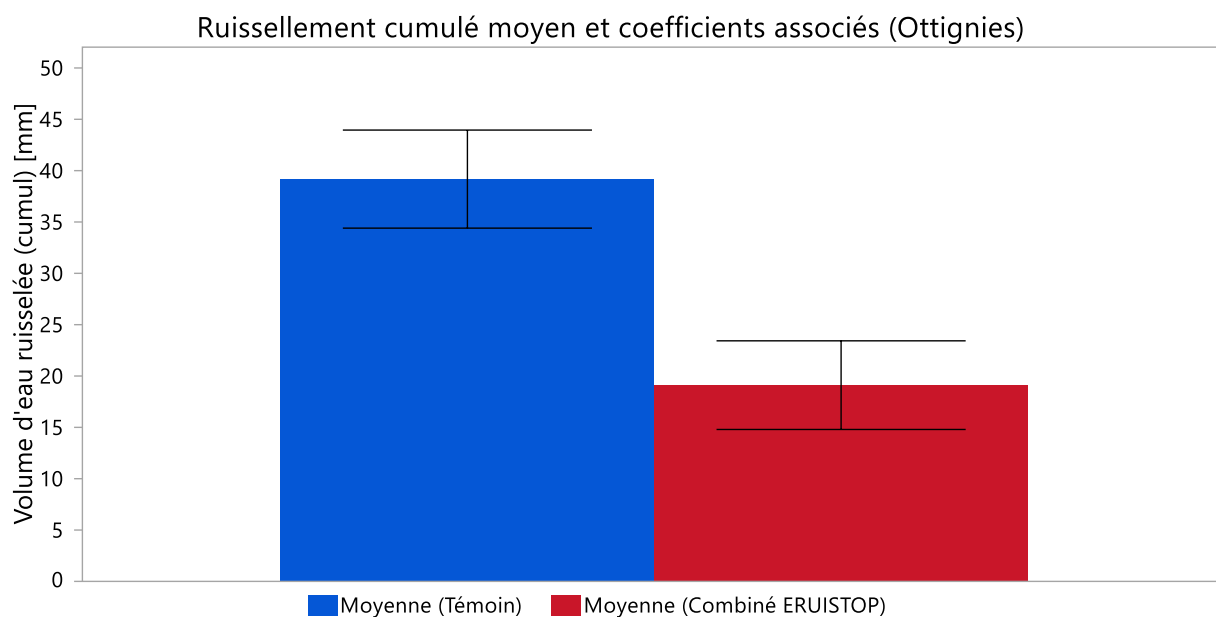


Figure 37: Ruissellement moyen pour l'ensemble des années étudiées (Ottignies). Les barres d'erreur sont construites sur base des moyennes des 3 essais.

5.2.1.2. Ittre

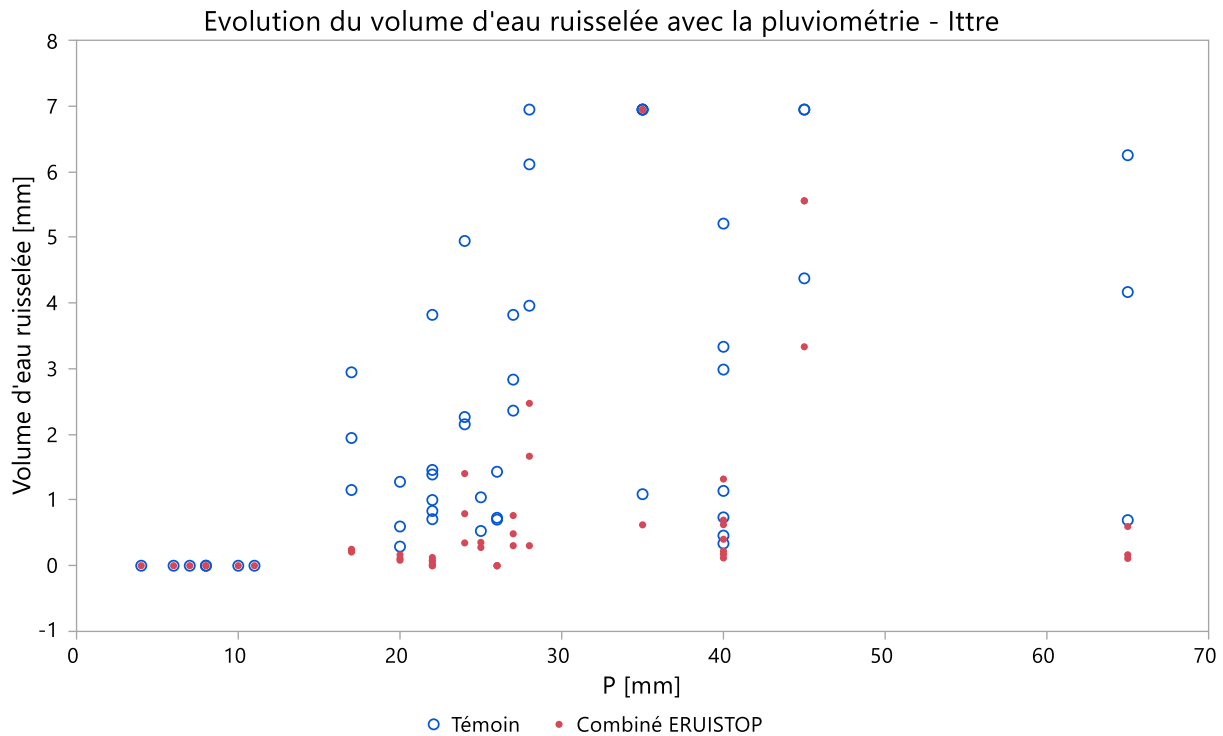


Figure 38: Volumes de ruissellement et pluies associées (Ittre). Données du CIPF. Trois valeurs de ruissellement, correspondant aux trois répétitions, sont mesurées pour chaque cumul pluviométrique.

La figure 38 montre la relation pluie-ruissellement pour le site d'Ittre. Comme pour Ottignies, le traitement ERUISTOP montre des résultats satisfaisants, présentant des volumes de ruissellement significativement réduits. Une différence est d'ailleurs visible concernant les seuils de ruissellement (SR). Alors que le SR semble se situer vers 15 mm pour le traitement Témoïn, il se voit retardé à 25 mm pour le traitement ERUISTOP.

Des valeurs de ruissellement importantes ont également fait déborder les bacs de récolte. L'analyse des données du CIPF permet de lier la plupart des événements ruisselants extrêmes à l'été 2016 (IRM, 2018b). La commune d'Ittre a connu des orages encore plus dévastateurs en 2014, contraignant les autorités à déclencher le plan catastrophe (RTBF, 2014), mais l'essai n'avait pas encore été mis en place cette année-là.

Les deux figures suivantes (Fig. 39 & 40) sont liées aux cumuls de ruissellement et CR associés. Les mêmes tendances que celles observées pour le site d'Ottignies sont visibles, avec une réduction de 58.2% du ruissellement pour le traitement ERUISTOP. Notons toutefois que les CR sont très semblables entre pluies ruisselantes (P_R) et pluies totales ($P_R + P_{NR}$). Ceci est dû à la méthodologie de récolte des données : peu de données non ruisselantes (P_{NR}) ont été recensées pour ce site.

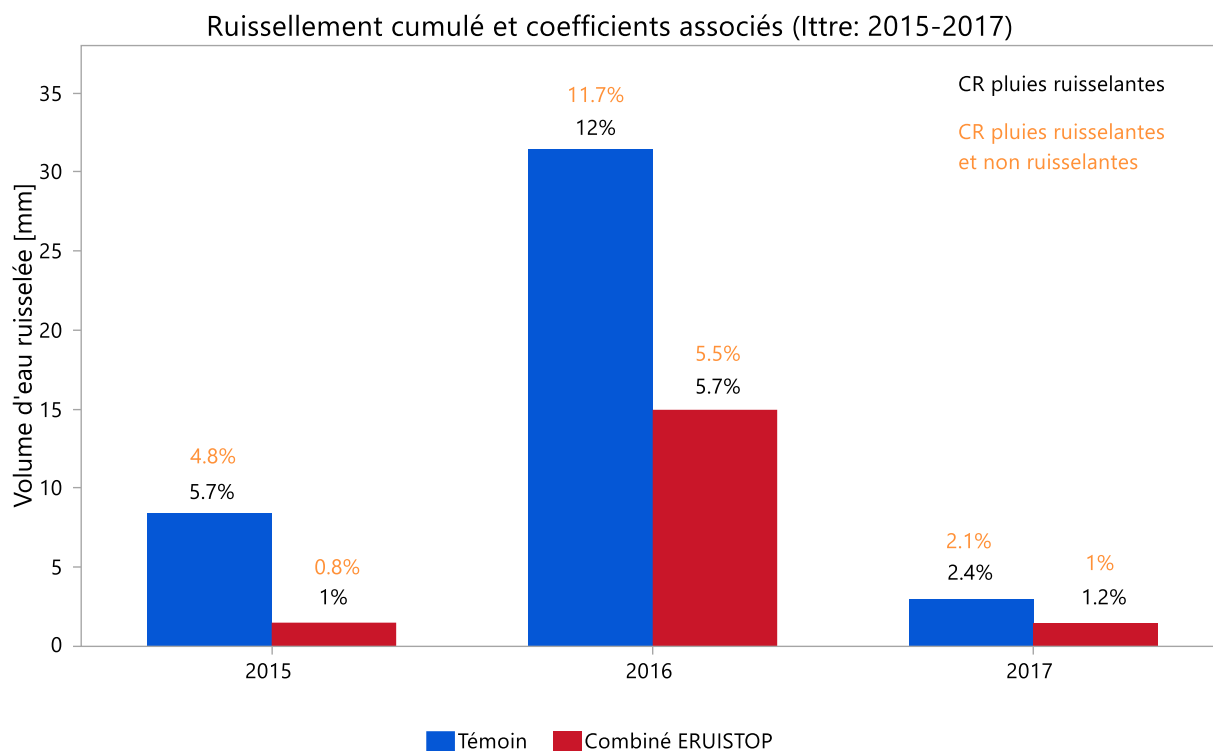


Figure 39: Ruissellement cumulé par saison et coefficients de ruissellement associés pour le site d'Ittre, pour chaque année. En noir : CR pour pluies ruisselantes uniquement ; en orange : CR pour les pluies totales. Une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP.

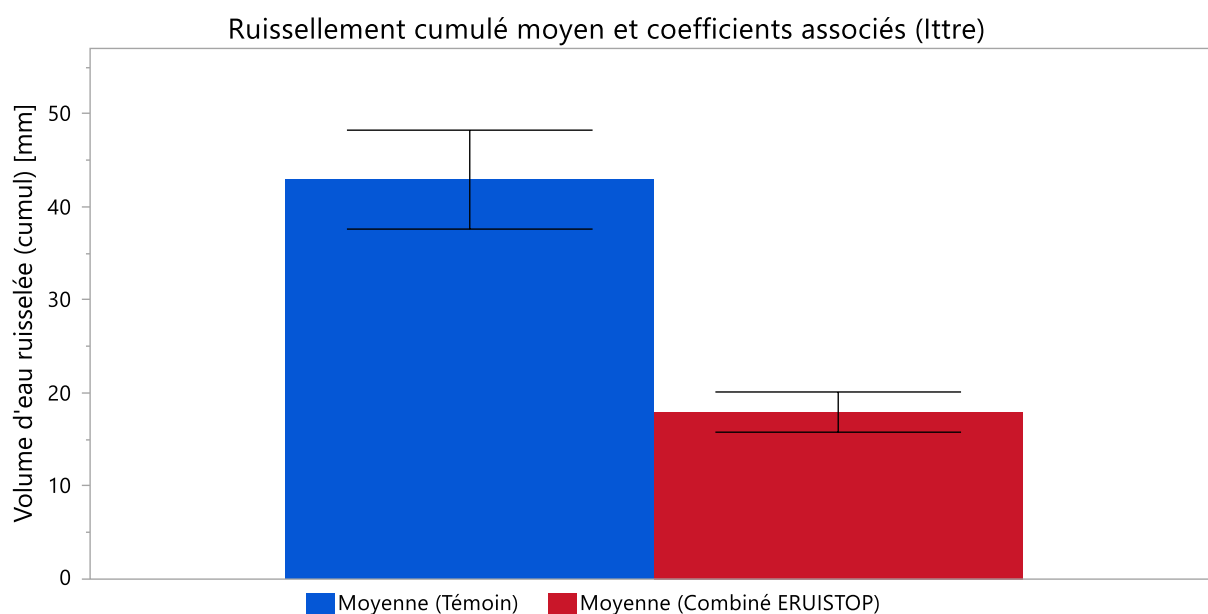


Figure 40: Ruissellement moyen pour l'ensemble des années étudiées (Ittre). Les barres d'erreur sont construites sur base des moyennes des 3 essais.

5.2.1.3. Virginal

La figure 41 ci-dessous montre la relation pluie-ruissellement pour le site de Virginal. Celui-ci n'ayant été étudié qu'un an, peu de données se voient disponibles pour la comparaison. Il est peut-être abusif de vouloir tenter d'estimer le SR sur base des 5 cumuls disponibles. Il en ressort tout de même des valeurs plus faibles de ruissellement pour le traitement ERUISTOP, ce qui est confirmé par la figure 42, où environ cinq fois moins de ruissellement est observé grâce au rouleau (réduction de 83%).

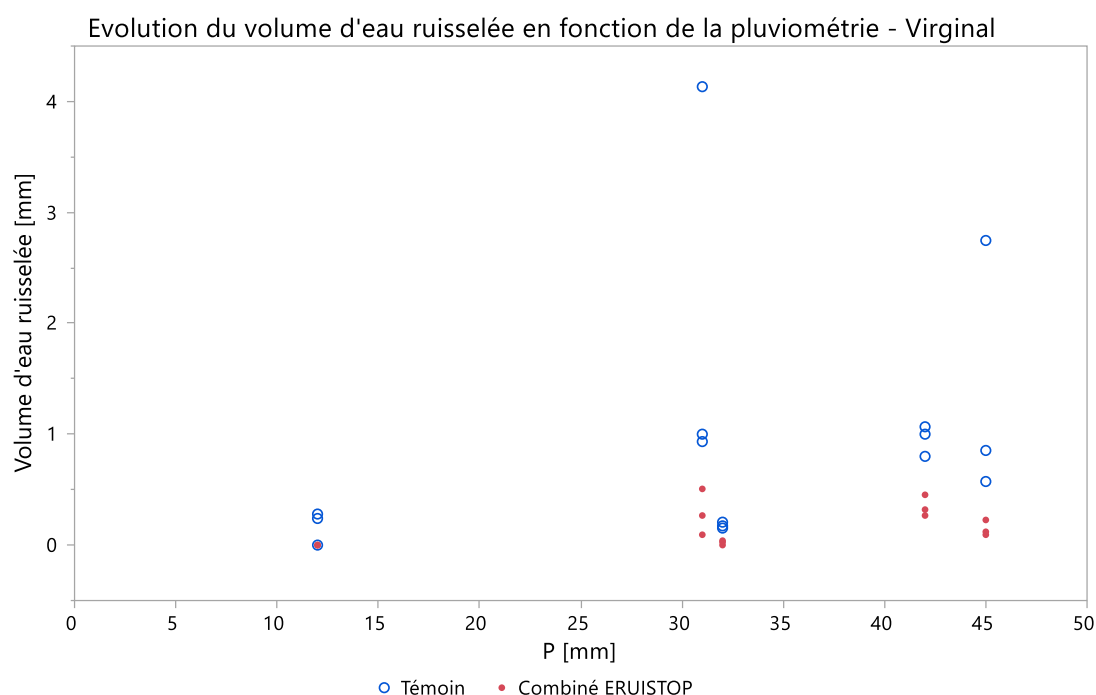


Figure 41: Volumes de ruissellement et pluies associées (Virginal). Données du CIPF. Trois valeurs de ruissellement, correspondant aux trois répétitions, sont mesurées pour chaque cumul pluviométrique.

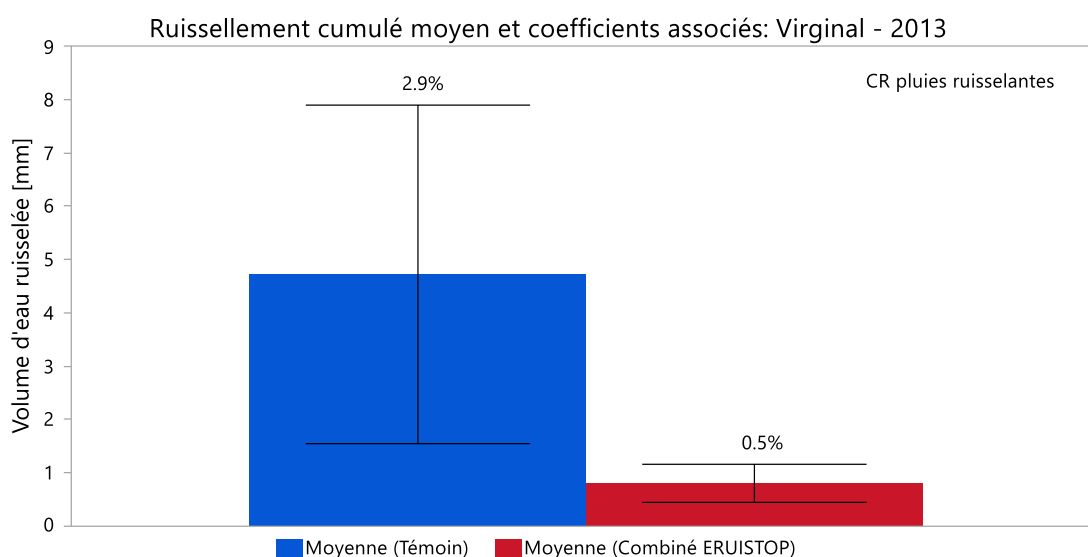


Figure 42: Ruissellement moyen et coefficients associés (Virginal). Les barres d'erreur sont construites sur base de la moyenne des 3 essais.

5.2.1.4. Hennuyères

Comme pour l'essai de Virginal, l'essai d'Hennuyères montre peu de données (Fig 43). Le plus faible cumul pluviométrique est de 12 mm et présente déjà de légers volumes de ruissellement. Il est donc compliqué d'estimer les SR pour les deux traitements sur base des quelques données. Le site montre un taux de réduction du ruissellement de 50.6 % pour le traitement ERUISTOP (Fig 44). Cette réduction est clairement visible sur la figure 43 pour les pluies de 25 et 45 mm.

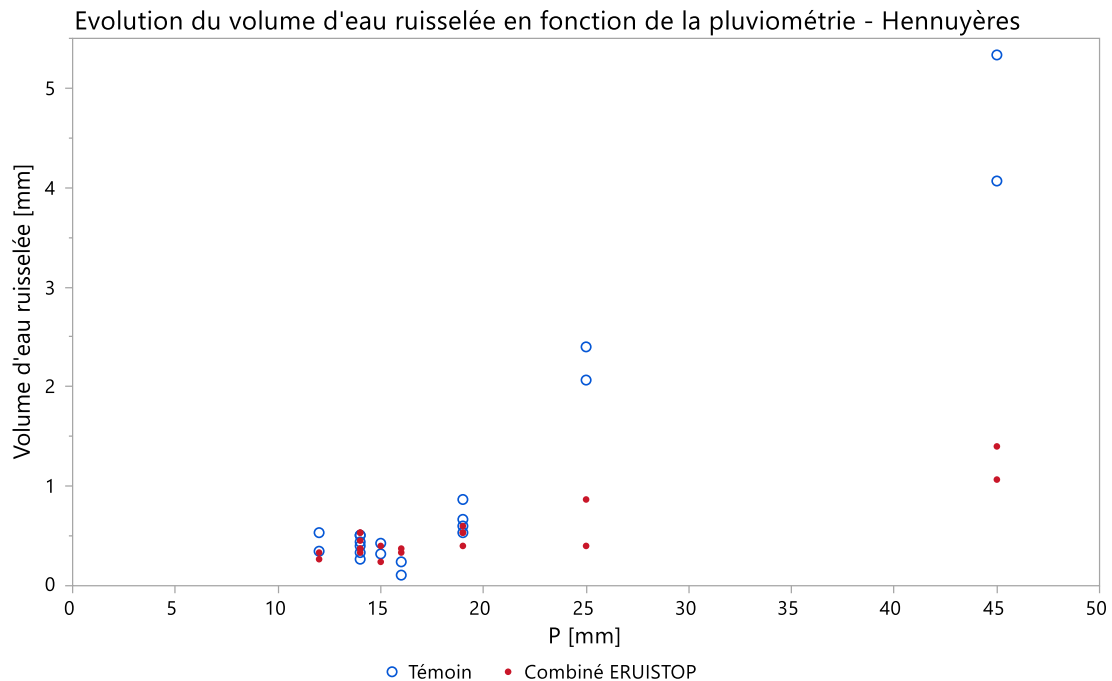


Figure 43: Volumes de ruissellement et pluies associées (Hennuyères). Données du CIPF. Deux valeurs de ruissellement, correspondant aux deux répétitions de cet essai, sont mesurées pour chaque cumul pluviométrique.

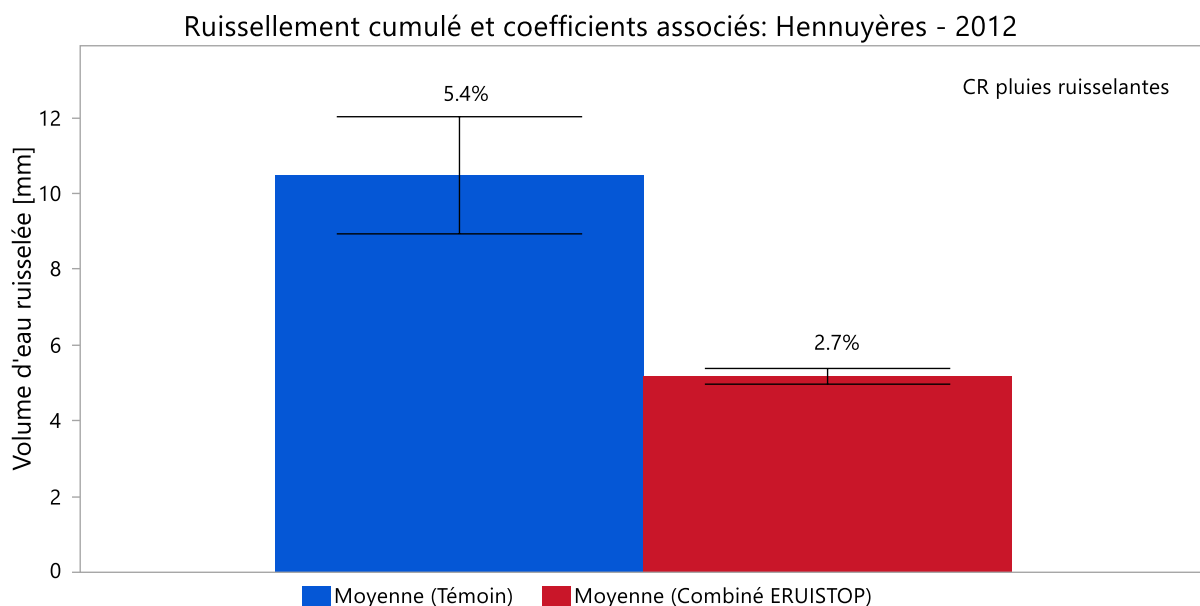


Figure 44: Ruissellement moyen et coefficients associés (Hennuyères). Les barres d'erreur sont construites sur base de la moyenne des 3 essais.

5.2.2. Ruissellement : Discussion

Les graphes présentent tous une allure similaire. Les relations pluie-ruissellement pour chaque essai montrent globalement un ruissellement croissant avec la pluviométrie, mais qui se voit réduit avec l'utilisation du rouleau antiérosif. Le traitement ERUISTOP montre pour chaque essai des volumes de ruissellement largement réduits, comparé au traitement Témoin (Tab. 11).

Tableau 11: Réduction du ruissellement grâce à l'utilisation du rouleau antiérosif, par site

	Taux de réduction du ruissellement [%]
Ottignies	51.2
Ittre	58.2
Virginal	83.0
Hennuyères	50.6

Notons que dans tous les cas, les cumuls pluviométriques ont besoin d'être comparé à leur intensité pour être interprété. Lorsque du ruissellement est observé pour de petits cumuls pluviométriques, c'est souvent parce que l'intensité de la pluie est importante. Au contraire, les cumuls pluviométriques importants qui montrent de faibles volumes de ruissellement sont expliqués par des faibles intensités. Dans notre cas, seule une analyse détaillée de la pluviométrie pour le site d'Ottignies a pu être faite

Les essais de Virginal et Hennuyères montrent trop peu de données que pour fournir une estimation fiable de SR. Les essais d'Ottignies et Ittre montrent quant à eux des seuils qui diffèrent et varient entre 15 et 25 mm. Les CR, résumés pour l'ensemble des essais en annexe 8.9, se voient réduits de manière similaire avec l'utilisation du rouleau. Notons que le sol de Virginal étant battant, il n'est pas étonnant d'observer des CR (basés sur pluies *ruisselantes* uniquement) du même ordre de grandeur que pour le site d'Ottignies, pourtant plus pentu (Fig. 36 & 42). Comme discuté précédemment, des valeurs plus importantes sont observées pour Ottignies en 2014 (Fig. 36) et Ittre en 2016 (Fig. 39) à cause de violents orages que ces communes ont rencontrés. Ceci explique pourquoi, lorsqu'on compare ces deux sites pour l'année 2016, on observe des CR et des volumes de ruissellement plus élevés à Ittre, malgré un site plus pentu à Ottignies.

En observant pour chaque essai les différentes répétitions, on remarque que des résultats parfois très différents peuvent être observés pour un même traitement (Fig. 38 & 41 par exemple). Ceci confirme les observations démontrées par Wendt *et al.* (1986) : malgré un traitement similaire sur des parcelles en apparence homogènes, il reste une part de variabilité dans les observations du ruissellement qui reste inexpliquée. Outre ces différences, les répétitions montrent des résultats *en moyenne* similaires (*cfr.* annexe 8.8).

Globalement, pour l'ensemble des essais, le combiné de semis permet de réduire le ruissellement de 55.96%. Ce chiffre est plus faible que les taux de réductions observés

récemment en culture de pomme de terre suite au cloisonnement des interbuttes par le Barbutte (*cfr.* §2.5.3) : le Barbutte étant utilisé en cultures sur billon, ses dépressions sont par défaut bien plus profondes, outre le fait qu'elles soient plus larges. Ceci mis à part, le taux de réduction du ruissellement pour le combiné ERuiStop reste très favorable.

5.2.3. Erosion : Résultats

Cette seconde partie présente l'ensemble des résultats liés à l'analyse des données de concentrations en sédiments. Une discussion plus approfondie et synthétique est présentée au §5.2.4.

5.2.3.1. Ottignies

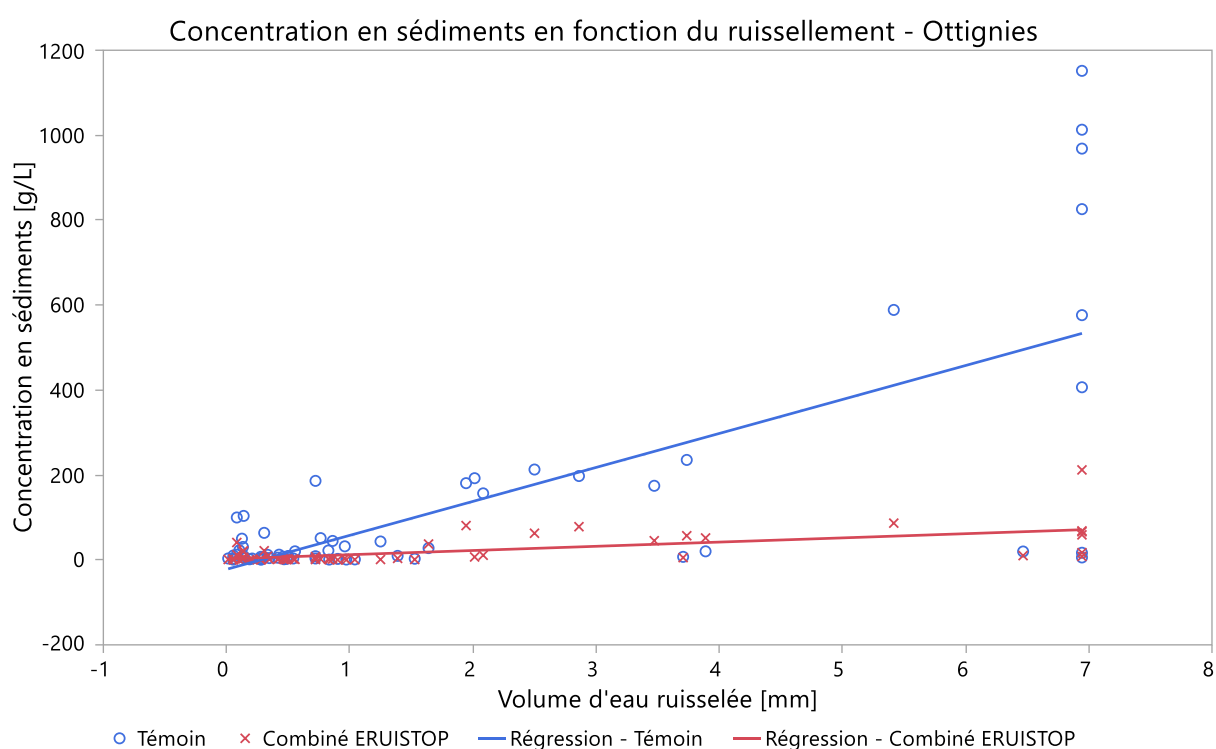


Figure 45: Concentration en sédiments recueillis dans les volumes de ruissellement, toutes années confondues (Ottignies)

On remarque pour l'essai d'Ottignies que les concentrations montent jusqu'à des valeurs très élevées (Fig. 45). A nouveau, ces valeurs extrêmes sont observées pour un volume d'eau de presque 7mm : les bacs ont débordé. Ceci est à nouveau expliqué par les orages de 2014 observés sur le Brabant Wallon. Les concentrations observées dépassent les 1000 g/L, il s'agit dans ces cas-là de boue et non plus de sédiments dilués. Cependant, puisqu'une partie des sédiments décante dans les bacs, l'eau qui se déverse est probablement moins concentrée en sédiments que l'eau entrante. Dès lors, la concentration dans le bac augmente graduellement. L'estimation des masses de sédiments est donc probablement moins faussée que celle du

volume de ruissellement lorsque les bacs débordent. Les valeurs de concentrations ne semblent en revanche jamais dépasser les 200 g/L avec l'utilisation du rouleau. A volume de ruissellement équivalent, la concentration en sédiments est quasi systématiquement inférieure ou égale dans le traitement ERUISTOP comparé au Témoin.

Le graphe suivant (Fig. 46) montre des résultats très positifs en termes de diminution des pertes en terres grâce au rouleau. En effet, l'échelle étant logarithmique, on observe une diminution de 88.5% pour l'ensemble des années. Une valeur extrêmement élevée est observée en été 2014 : 132 T/ha de pertes en terre. Avec l'utilisation du combiné de semis ERuiStop, cette valeur a été réduite de 91.38 %.

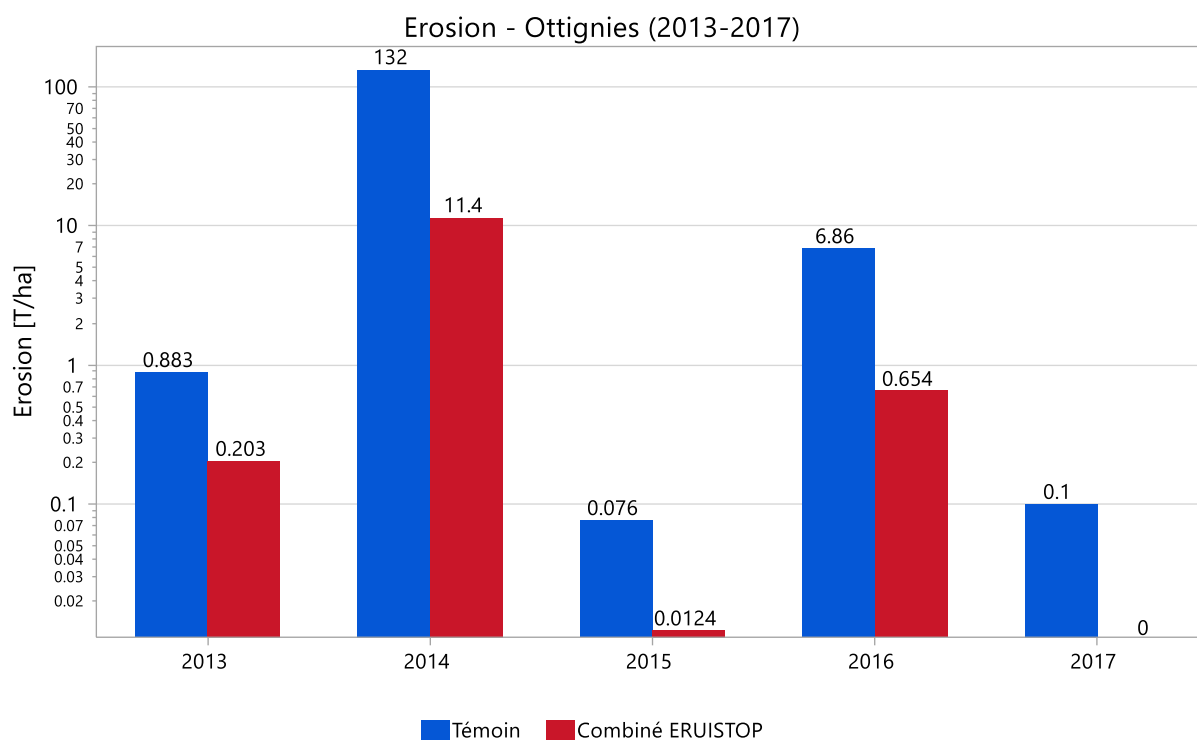


Figure 46 : Pertes en terre observées pour chaque année ; une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP (Ottignies). NB : utilisation d'une échelle logarithmique pour mieux visualiser les pertes en terre. Le nombre indiqué représente la valeur précise calculée.

5.2.3.2. Ittre

Les résultats pour l'essai d'Ittre en termes d'érosion sont similaires à ceux observés pour Ottignies (Fig. 47 & 48), excepté qu'aucune boue n'est observée. Les concentrations en sédiments ne dépassent pas non plus les 200 g/L, mais une même remarque que pour Ottignies concernant la capacité maximale des bacs peut être faite. Les pertes en terre sont les plus importantes en 2016, année de fortes inondations. L'utilisation du combiné ERuiStop a pourtant permis de réduire les pertes en terre de 72.61 % cette année-là. Toutes répétitions confondues, le combiné montre finalement une réduction importante des pertes en terre, égale à 82%.

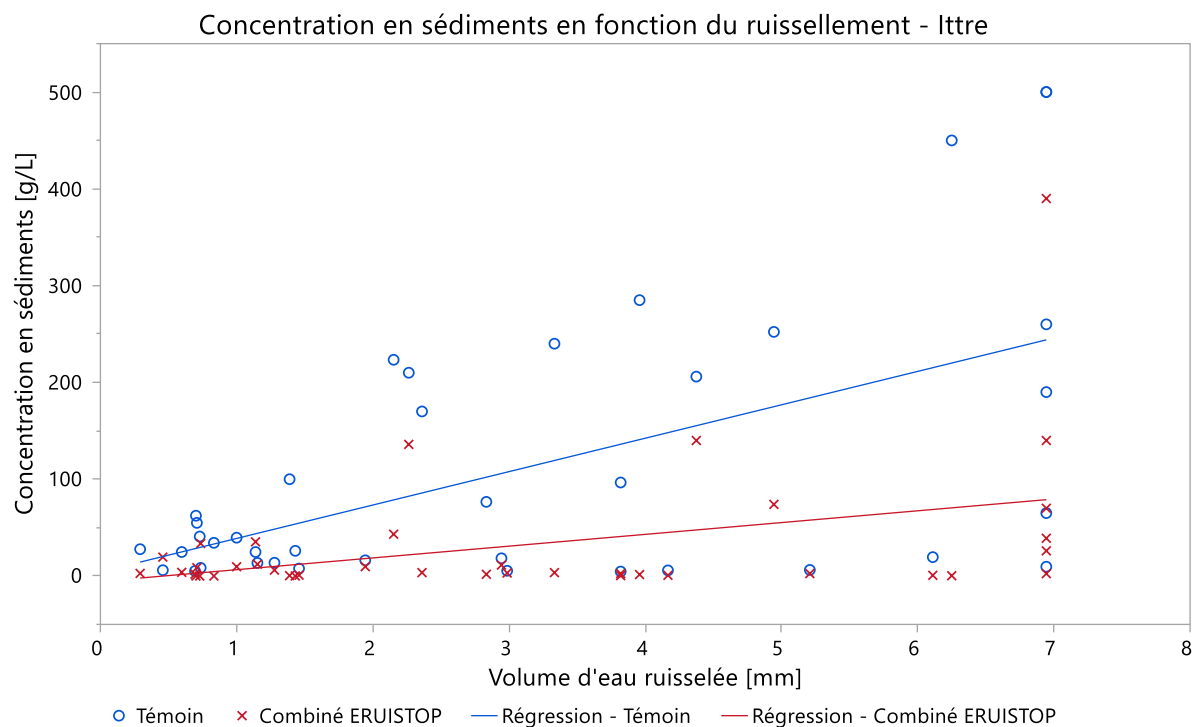


Figure 47: Concentration en sédiments recueillis dans les volumes de ruissellement, toutes années confondues (Ittre)

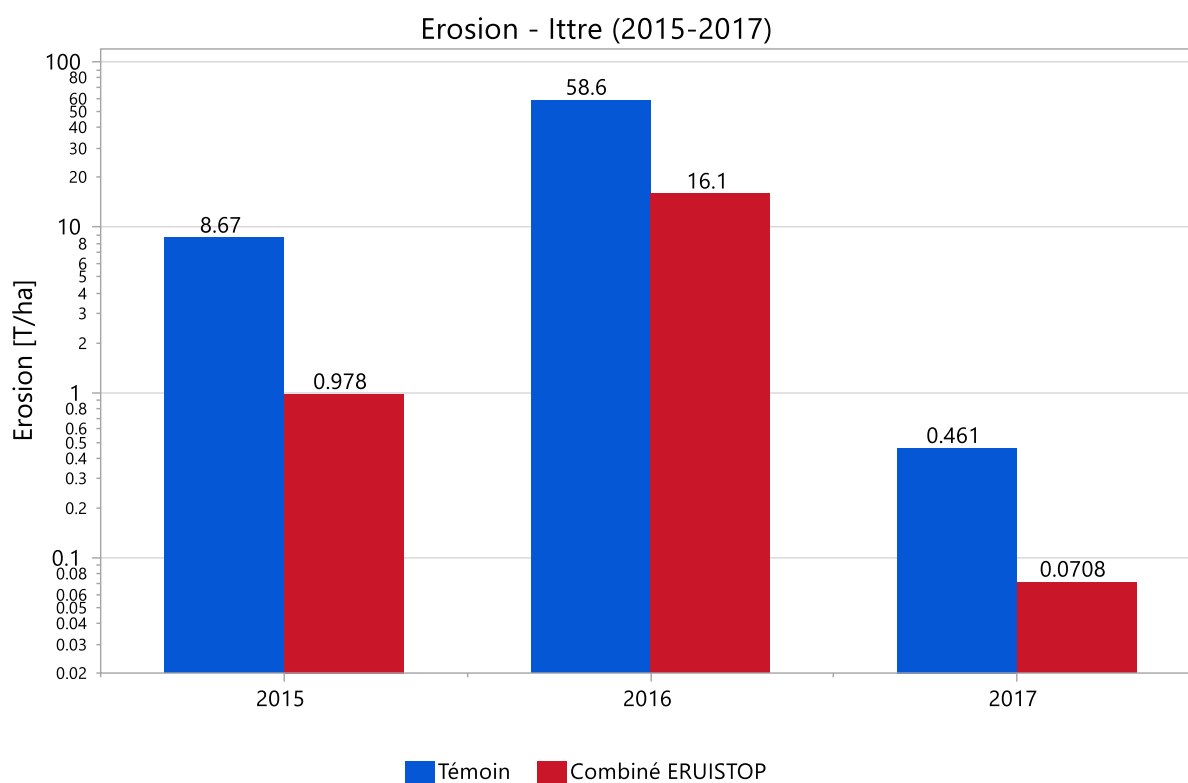


Figure 48: Pertes en terre observées pour chaque année (Ittre) ; une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP. NB : utilisation d'une échelle logarithmique pour mieux visualiser les pertes en terre. Le nombre indiqué représente la valeur précise calculée.

5.2.3.3. Virginal

Comme pour les données de ruissellement, le site de virginal présente peu de mesures de concentrations en sédiments, pour lesquelles le traitement ERUISTOP montre des résultats favorables (Fig. 49). Les pertes en terre sont également largement réduites (réduction de 96.2%), comme le montre la figure 50.

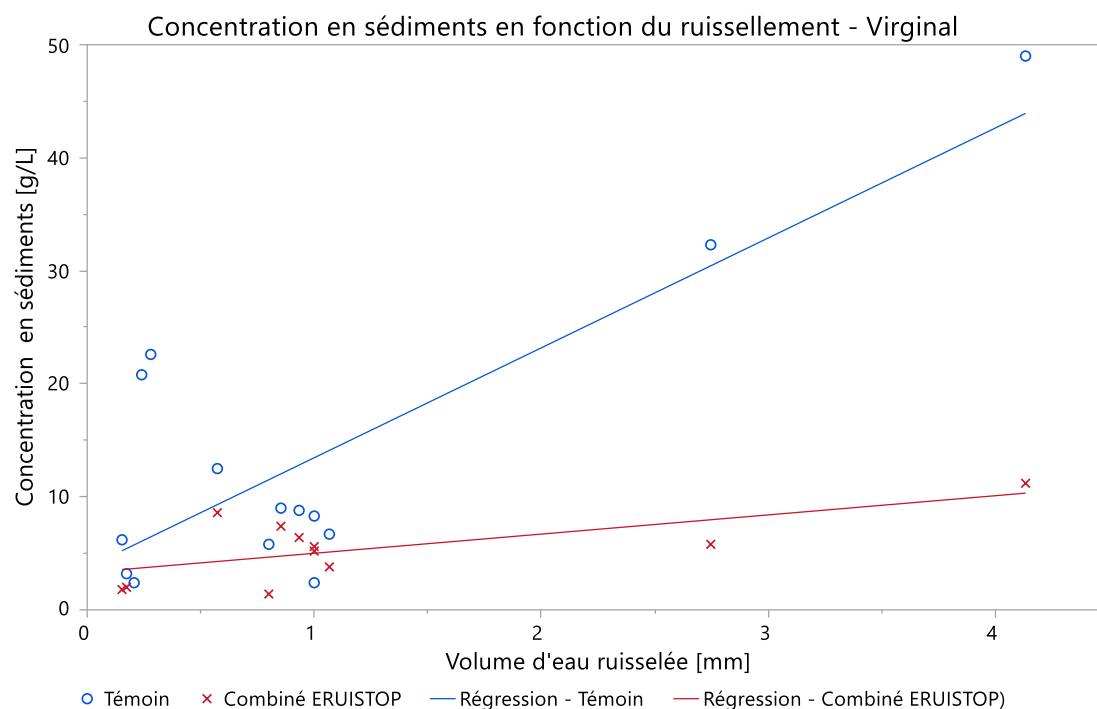


Figure 49: Concentration en sédiments recueillis dans les volumes de ruissellement, (Virginal)

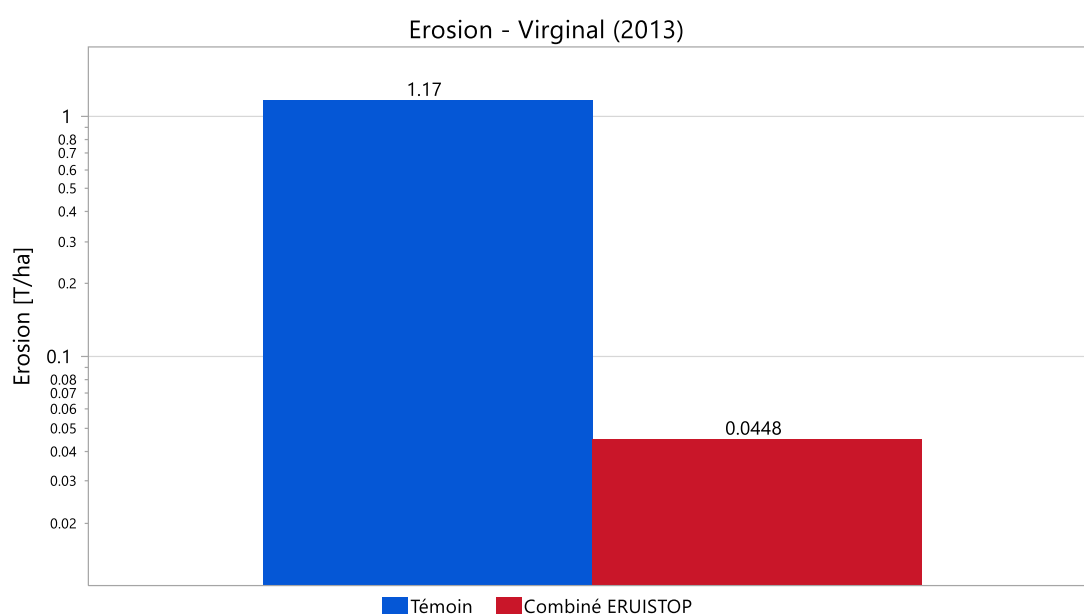


Figure 50: Pertes en terre observées pour chaque année (lttre) ; une comparaison est effectuée entre les traitements Témoin et ERUISTOP. NB : utilisation d'une échelle logarithmique pour mieux visualiser les pertes en terre. Le nombre indiqué représente la valeur précise calculée.

5.2.3.4. Hennuyères

NB : Aucun cumul n'a pu être calculé pour le site d'Hennuyères car les concentrations en sédiments n'ont pas été relevées à chaque passage sur le terrain lorsque les autres données étaient recensées. Le taux de diminution d'érosion grâce au rouleau peut tout de même être calculé sur base des quelques valeurs recensées. Le traitement ERUISTOP démontre à nouveau l'efficacité du rouleau antiérosif (Fig. 51), avec une réduction des pertes en terre de 64.1%.

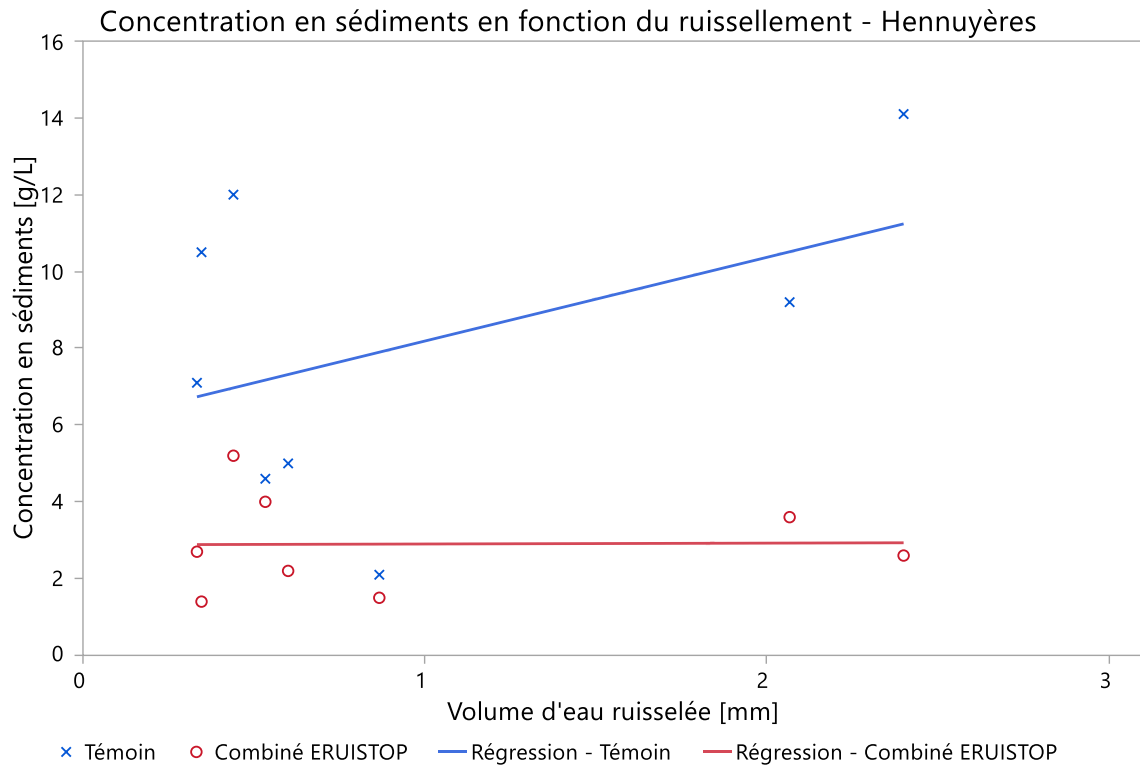


Figure 51: Concentration en sédiments recueillis dans les volumes de ruissellement (Hennuyères).

5.2.4. Erosion : Discussion

Le rouleau montre des résultats très concluants concernant les pertes en terre pour chacun des essais (Tab. 12). Les dépressions dans le sol ont un double effet sur les sédiments. D'une part, elles permettent de retenir les sédiments emportés par les eaux de ruissellement. D'autre part, les dépressions diminuent la vitesse du ruissellement, favorisant la sédimentation dans le relief.

Il est intéressant de noter que même pour des orages intenses, le rouleau antiérosif montre des résultats très positifs. En effet, que cela soit pour Ottignies en 2014 ou Ittre en 2016, les pertes en terre sont réduites de façon significative (réduction de 91.38% à Ottignies en 2014 et 72.81% à Ittre en 2016).

Tableau 12: Réduction des pertes en terre grâce à l'utilisation du rouleau antiérosif, par site.

	<i>Taux de réduction de l'érosion [%]</i>
Ottignies	88.5
Ittre	82.0
Virginal	96.2
Hennuyères	64.1

De manière générale, l'efficacité du rouleau est indiscutable en termes d'érosion, avec une réduction moyenne des pertes en terre de 85.9 % pour l'ensemble des essais. Ce chiffre est quasiment aussi important que les taux de réduction observés récemment en culture de pomme de terre suite au cloisonnement des interbuttes par le Barbutte (*cfr.* §2.5.3), qui crée des dépressions pourtant plus profondes. Le traitement ERUISTOP, tout comme le *tied ridging*, se montre très performant en termes de réduction des pertes en terre.

5.3. Estimation des Curve Numbers

5.3.1. Estimation sur base des cumuls du CIPF

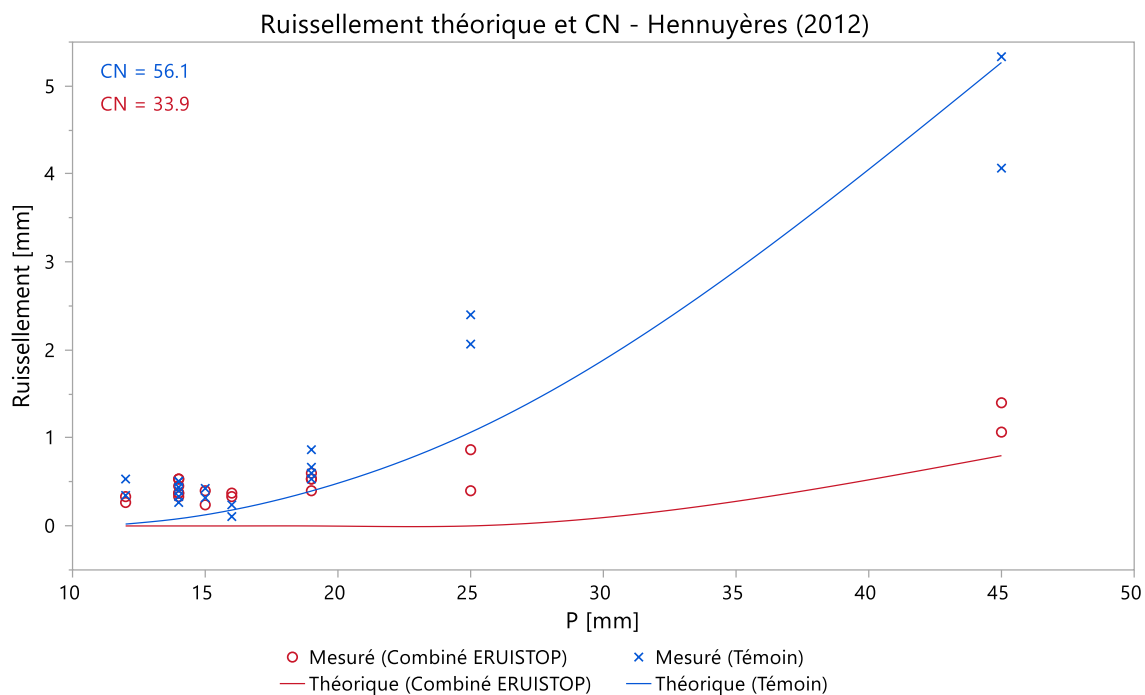


Figure 52: Ruissellement théorique et CN calculés pour le site d'Hennuyères ; comparaison entre traitements Témoin et ERUISTOP.

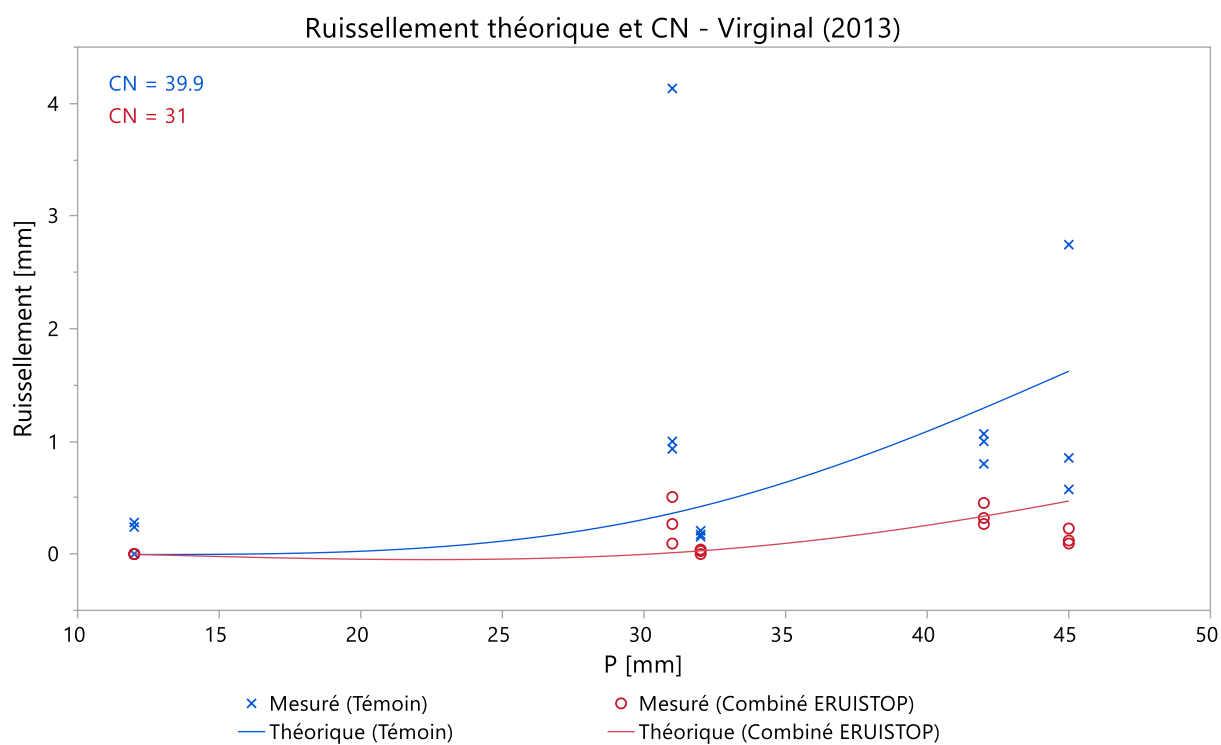


Figure 53: Ruissellement théorique et CN calculés pour le site de Virginal ; comparaison entre traitements Témoin et ERUISTOP.

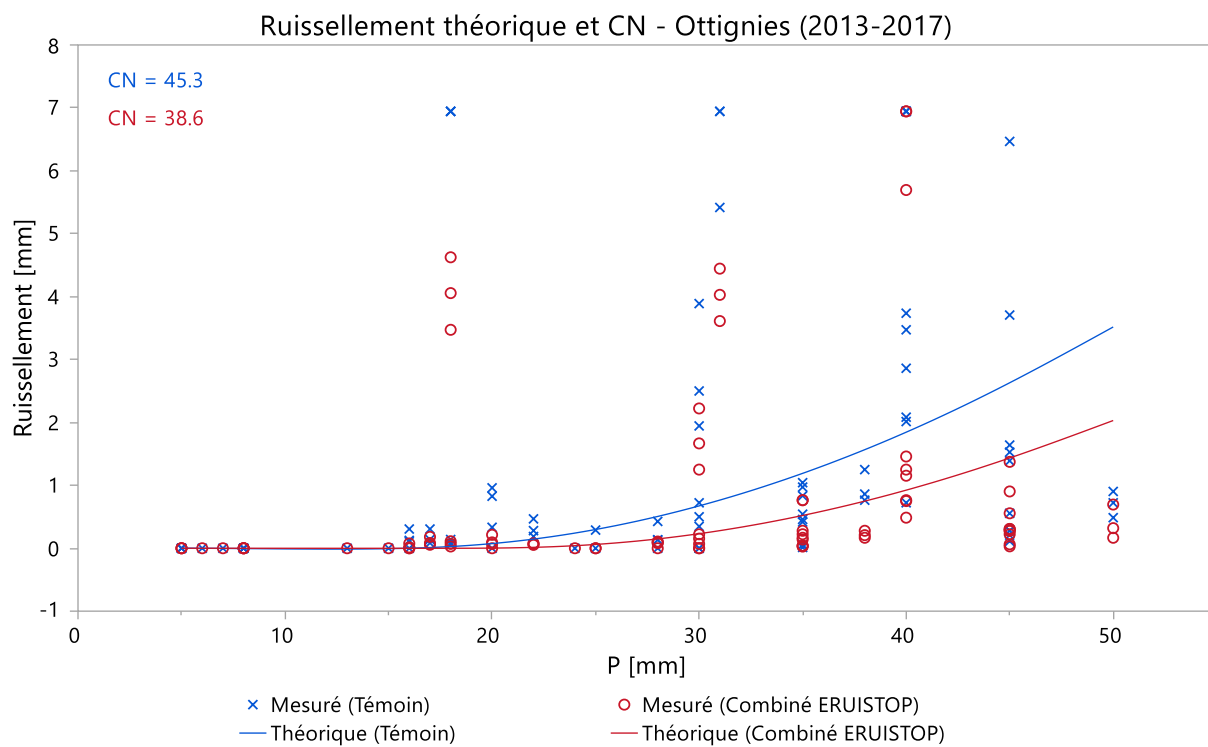


Figure 54: Ruissellement théorique et CN calculés pour le site d'Ottignies ; comparaison entre traitements Témoin et ERUISTOP.

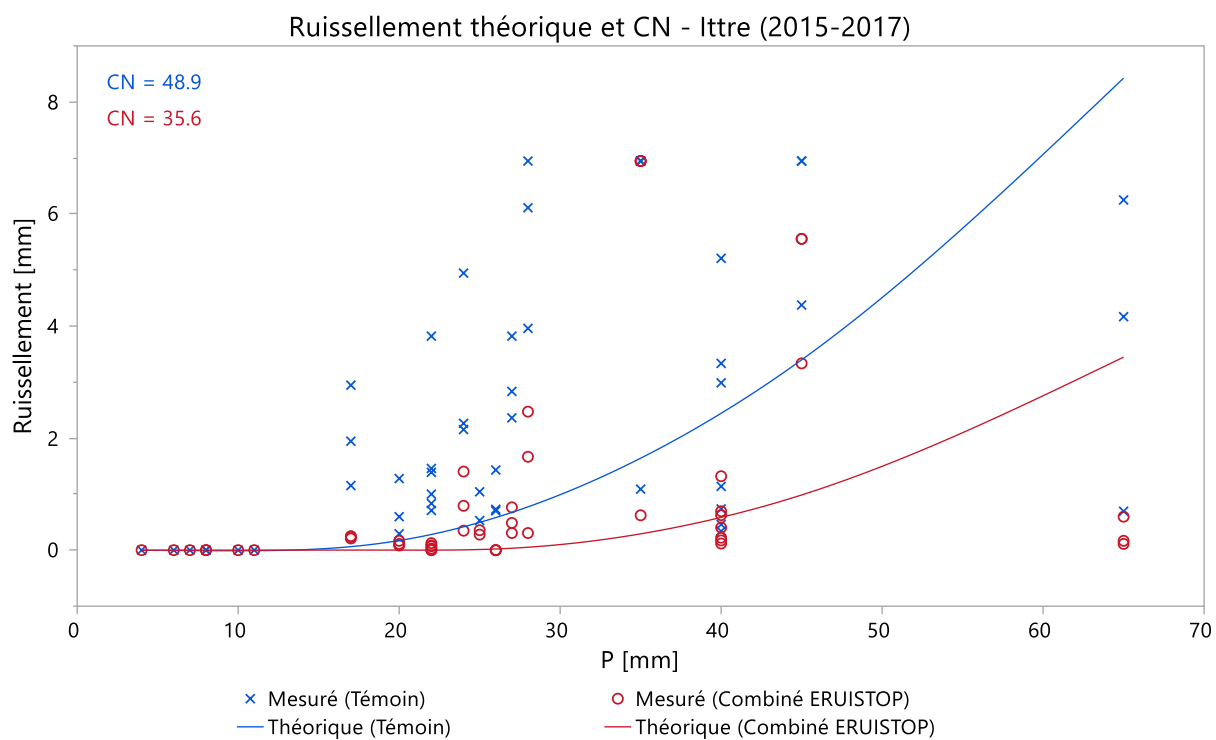


Figure 55: Ruissellement théorique et CN calculés pour le site d'Ittre ; comparaison entre traitements Témoin et ERUISTOP.

Les résultats pour les sites d'Hennuyères montrent que le ruissellement calculé, et donc le CN associé, sont relativement bien corrélés avec les mesures expérimentales du CIPF (Fig. 52). En effet, pour les traitements Témoin et ERUISTOP, ce site montre des indicateurs de qualité assez positifs (Tab. 13). On constate logiquement une baisse dans la valeur du CN pour le traitement ERUISTOP. Le site de Virginal montre quant à lui des CN encore plus faibles que l'essai d'Hennuyères (Fig. 53), mais les indicateurs de qualité pour cet essai sont assez mauvais. Les essais d'Ottignies et Ittre présentent des résultats encore pires : on observe une forte sous-estimation au niveau du ruissellement théorique, ce qui explique les valeurs assez mauvaises des indicateurs (RMSE élevés et R^2 faibles) (Tab. 13). En effet, beaucoup de points se trouvent au-dessus de la courbe, qui semble être fortement tirée vers le bas par ces points présentant d'importants cumuls pluviométriques (Fig. 54 & 55). Cependant, ce sont ces points qui représentent des volumes de ruissellement anormalement bas comparé au reste des données.

Tableau 13: CN optimisés et indicateurs de qualité, sur base des essais et données du CIPF.

	CN		RMSE [mm]		R^2	
	<i>Témoin</i>	<i>ERUISTOP</i>	<i>Témoin</i>	<i>ERUISTOP</i>	<i>Témoin</i>	<i>ERUISTOP</i>
<i>Hennuyères</i>	56.1	33.9	0.54	0.37	0.91	0.73
Virginal	39.9	31	1.12	0.21	0.06	0.10
<i>Ottignies</i>	45.3	38.6	2.26	1.62	0.03	0.01
Ittre	48.9	35.6	2.71	2.12	0.12	0.007

De manière générale, on remarque donc que les CN sont assez faibles (40-50), ce qui est inattendu compte tenu des valeurs théoriques pour une telle culture. En effet, sur base des tables (annexe 8.10), pour une culture sarclée, on s'attend à observer des CN au minimum égal à 70 et pouvant monter jusqu'à 90 dans les pires conditions.

Ceci est expliqué par le fait que la méthode du CN est une méthode événementielle qui se base sur des pluies journalières, uniquement valable pour des événements où du ruissellement est observé. Or, beaucoup de pluies utilisées dans la modélisation ne sont pas ruisselantes ou alors cumulées sur une période dépassant la journée. Dès lors, les résultats sont faussés et les CN sous-estimés. Ceci explique donc les résultats relativement mauvais observés jusqu'ici.

5.3.2. Estimation sur base des pluies journalières de la PAMESEB

Une nouvelle estimation du CN peut être faite pour le site d'Ottignies, sur base des données de la PAMESEB. Les données horaires étant disponibles, il est possible de déceler l'événement en particulier ayant généré le ruissellement sur base de son intensité maximale (*cfr.* Fig. 16) Chaque événement ainsi décelé est analysé, de sorte à en dégager les principales caractéristiques : durée de l'événement, intensité maximale au sein de l'événement ou encore intensité moyenne sur la durée de l'événement. Dès lors, seules des pluies journalières seront utilisées dans la modélisation et les CN nouvellement déterminés devraient se voir plus

corrects. Le graphique ci-dessous (Fig. 56) présente les résultats nouvellement obtenus ; les CN et indicateurs de qualité sont repris dans le tableau 14.

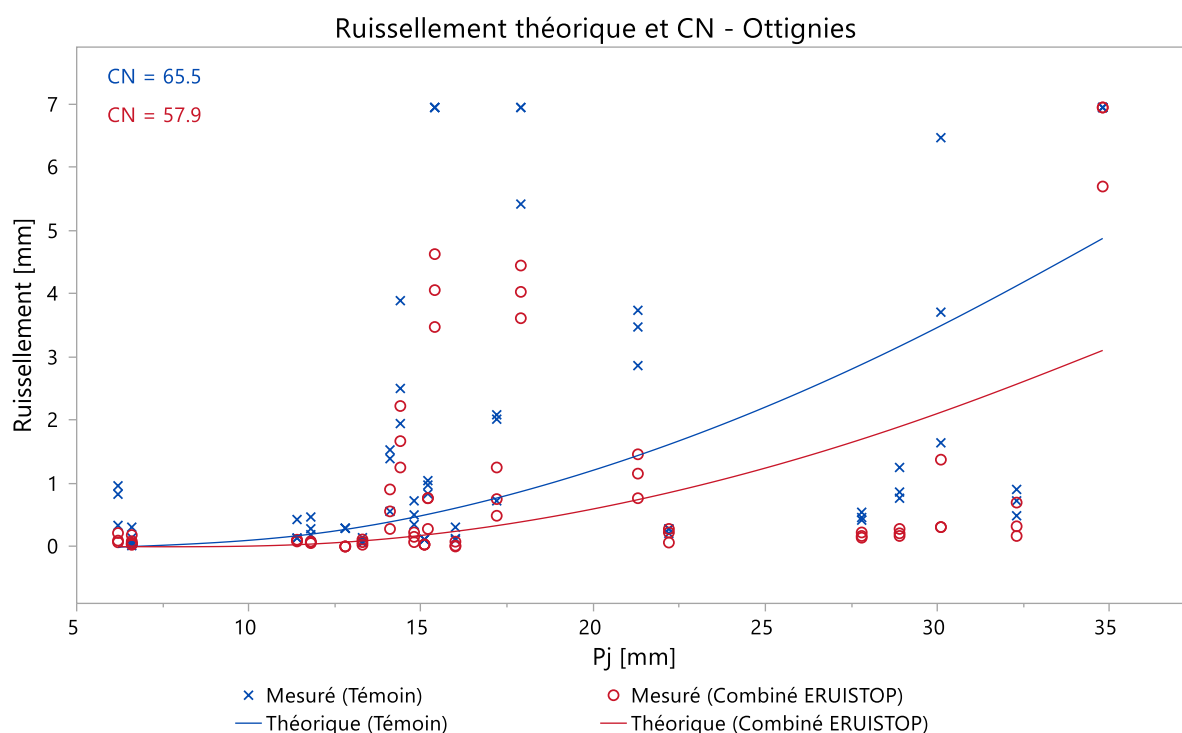


Figure 56: Ruissellement théorique et CN - Série temporelle d'Ottignies. Le CN est déterminé sur base des pluies journalières P_j (PAMESEB).

Tableau 14: CN optimisés et indicateurs de qualité.

	Témoin	Combiné ERuiStop
CN	65.5	57.9
RMSE [mm]	2.27	1.57
R^2	0.13	0.15

Les CN sont déjà plus élevés que ceux calculés précédemment mais restent faibles, et les indicateurs de qualité se voient toujours insatisfaisants. Ceci est expliqué pour la raison suivante : les volumes de ruissellement sont mesurés pour les *cumuls périodiques*, alors que les pluies sont *journalières*. Les données étant cumulées sur de longues périodes, plusieurs événements au sein d'un même cumul sont donc parfois à l'origine du ruissellement. Or ici c'est à chaque fois l'événement pluvieux le plus probable au sein du cumul périodique qui a été utilisé (*cfr.* Fig. 16). Les volumes de ruissellement sont donc probablement dus à des précipitations plus importantes que celles utilisées pour la modélisation.

Pour pallier ce problème, il aurait fallu soit posséder les données de ruissellement strictement liées aux pluies journalières (ce qui n'est pas le cas), soit connaître précisément le volume

d'eau à l'origine du ruissellement. Dans ce second cas, il est possible de retrouver dans le jeu de données de la PAMESEB les volumes de ruissellement pour lesquels on est sûr que la pluie journalière est le seul et unique événement pluvieux qui est responsable de la production du ruissellement.

En appliquant cette méthodologie, on obtient des CN plus proches de la réalité mais un jeu de données moins étoffé (Fig. 57). On constate que peu de cas où seule une pluie journalière est responsable du ruissellement sont recensés, ce qui pourrait expliquer les indicateurs de qualité présentés au tableau 15, toujours peu satisfaisants.

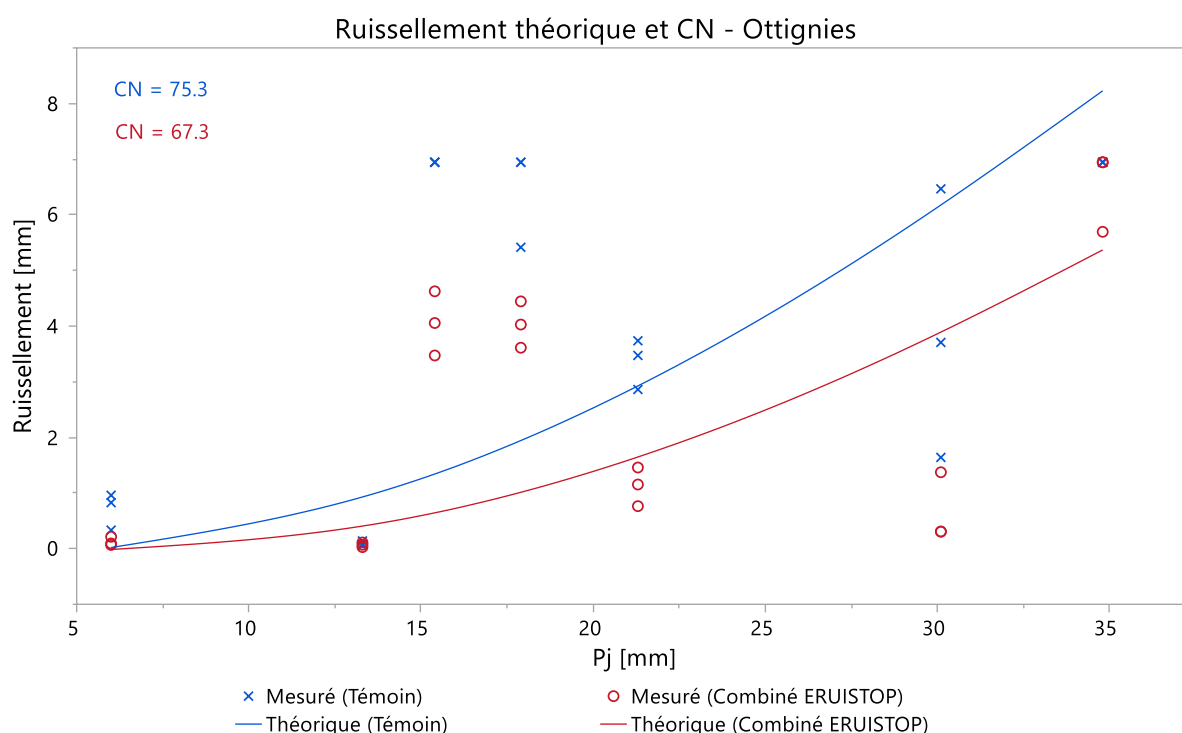


Figure 57: Ruissellement théorique et CN - Série temporelle d'Ottignies. Le CN est déterminé sur base des pluies journalières P_j (PAMESEB).

Tableau 15: CN optimisés et indicateurs de qualité : 2nd essai.

	Témoin	Combiné ERuiStop
CN	75.3	67.3
RMSE [mm]	3.03	2.20
R^2	0.18	0.22

Même si moins de données sont disponibles pour cette estimation, celle-ci semble finalement la plus fiable car les données de pluie implémentées respectent les conditions de la méthode du CN (utilisation de pluies journalières stricte). Rappelons finalement que la méthode du CN reste une méthode empirique et qu'elle ne peut prédire avec exactitude le ruissellement sur base des pluies et paramètres implémentés.

5.4. Caractérisation des dépressions et détermination de la capacité de rétention

Cette partie présente l'ensemble des résultats liés à la génération des MNT par photogrammétrie, ainsi que l'analyse des différentes simulations de remplissage des dépressions. Le premier essai lié à Jurbise est tout d'abord analysé et discuté. Les 3 essais de Marbaix sont ensuite analysés et comparés entre eux, mais également comparés avec l'essai de Jurbise. L'erreur liée à la photogrammétrie est finalement discutée.

5.4.1. Résultats : parcelle de Jurbise

5.4.1.1. *Modèle Numérique de Terrain*

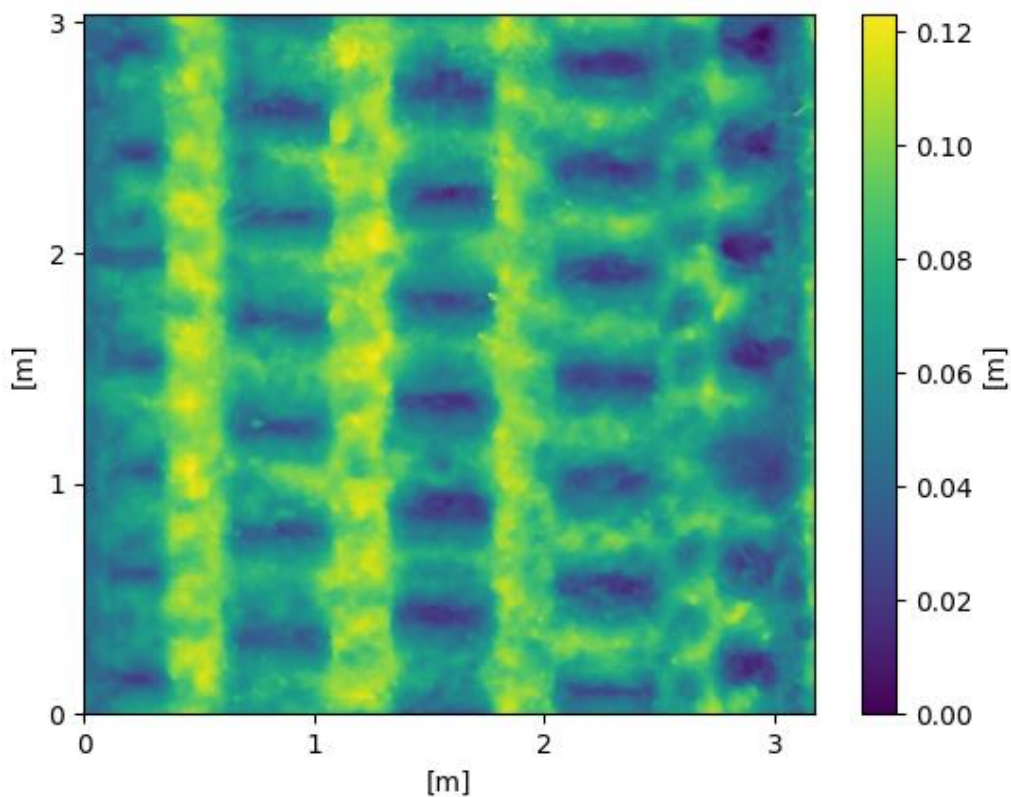


Figure 58: MNT représentatif de l'essai de Jurbise (pente de 0%).

La figure 58 présente le MNT généré pour la parcelle de Jurbise, suite aux différentes manipulations expliquées au §4.2.4, pour une pente nulle. Le MNT présente une résolution horizontale de 3.3 mm pour une superficie d'environ 9 m². On observe une différence d'élévation d'environ 12 cm entre les points les plus élevés de la parcelle et le fond des

dépressions. Le MNT nous indique que les dépressions sont profondes d'environ 6 cm, ce qui est confirmé par la figure 59 ci-dessous. Les lignes de semis se voient plus élevées que le reste du terrain, car le rouleau ne travaille pas le sol à cet endroit.

5.4.1.2. Capacité de rétention maximale

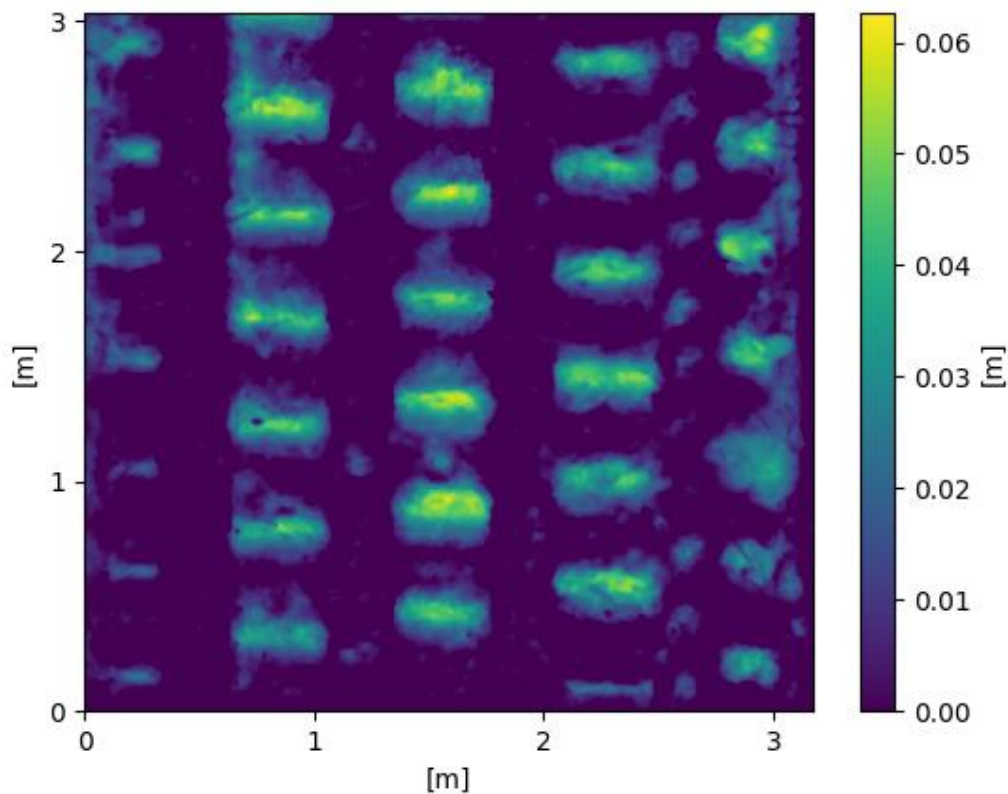


Figure 59: Rétention maximale de l'eau dans les dépressions (MNT de Jurbise, pente de 0%).

La figure 59 permet de visualiser le résultat de la simulation produite avec l'algorithme de remplissage. On peut y observer l'épaisseur de la lame d'eau retenue dans les dépressions créées par le combiné de semis ERuiStop (sur la parcelle de Jurbise à plat dans le cas présent). L'eau peut s'accumuler jusqu'à une hauteur d'un peu plus de 6 cm, ce qui correspond à la profondeur des dépressions déterminée précédemment. En divisant le volume d'eau stocké par la superficie du MNT, on obtient un DSmax égal à 7.35 mm pour la parcelle de Jurbise, lorsqu'elle est à plat.

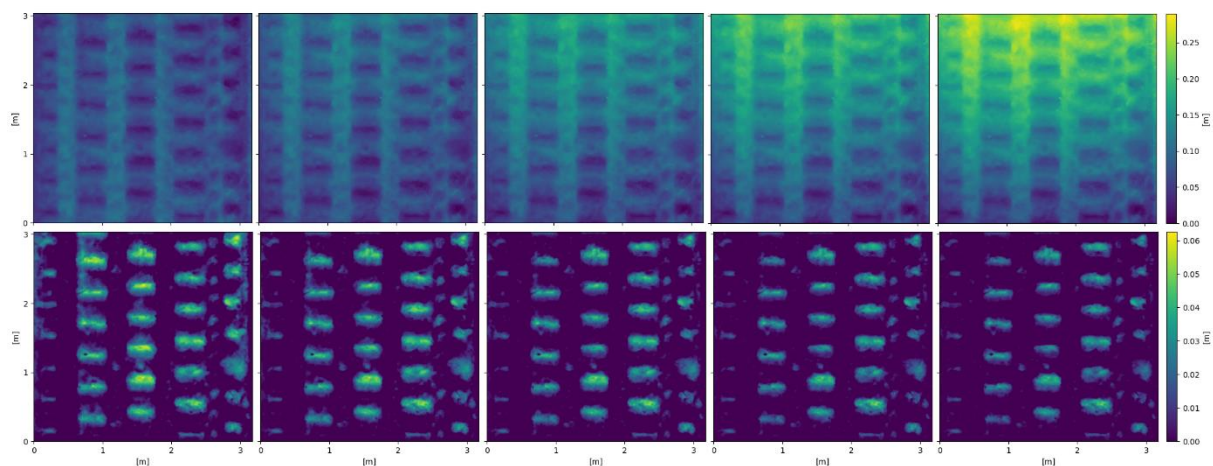


Figure 60: Comparaison entre les MNT générés (haut) et les DSmax calculés (bas) pour les différentes pentes de l'essai de Jurbise. De gauche à droite, pentes de 0, 5, 10, 15 et 20%.

Les effets de la pente sont visualisés à la figure 60 et les différents résultats sont visibles sur les figures 61 et 62 ci-dessous. Un tableau reprenant l'ensemble des valeurs clés est situé en annexe 8.13.

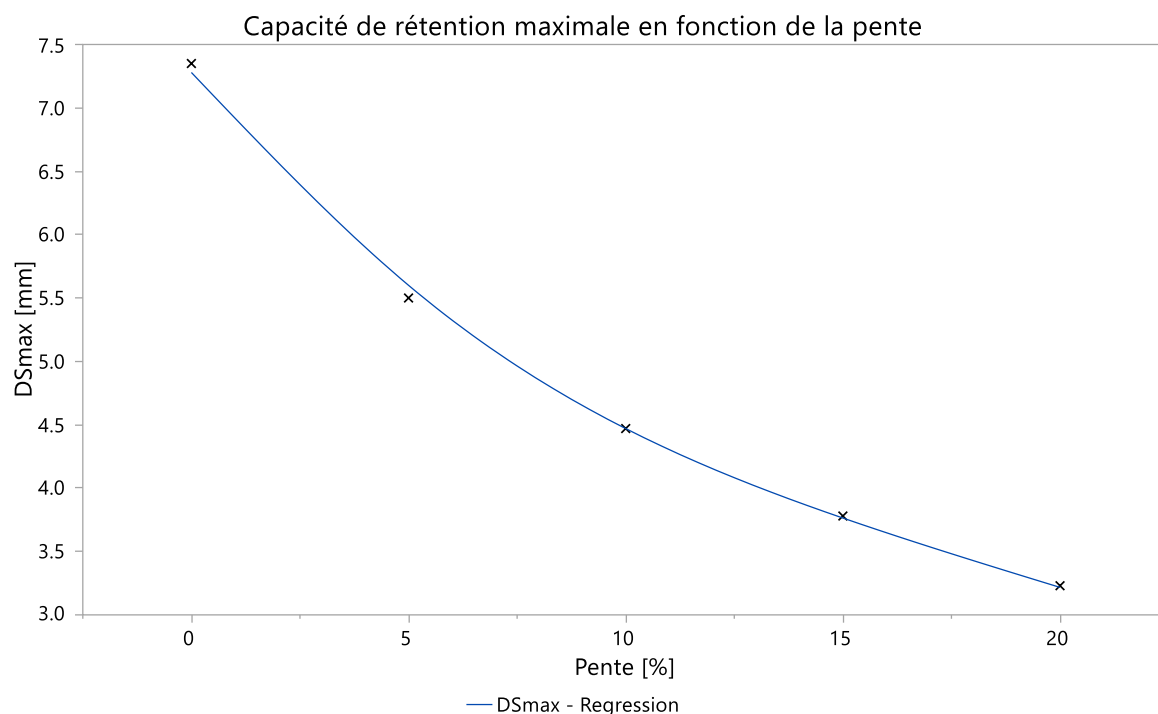


Figure 61: DSmax en fonction de la pente - essai de Jurbise.

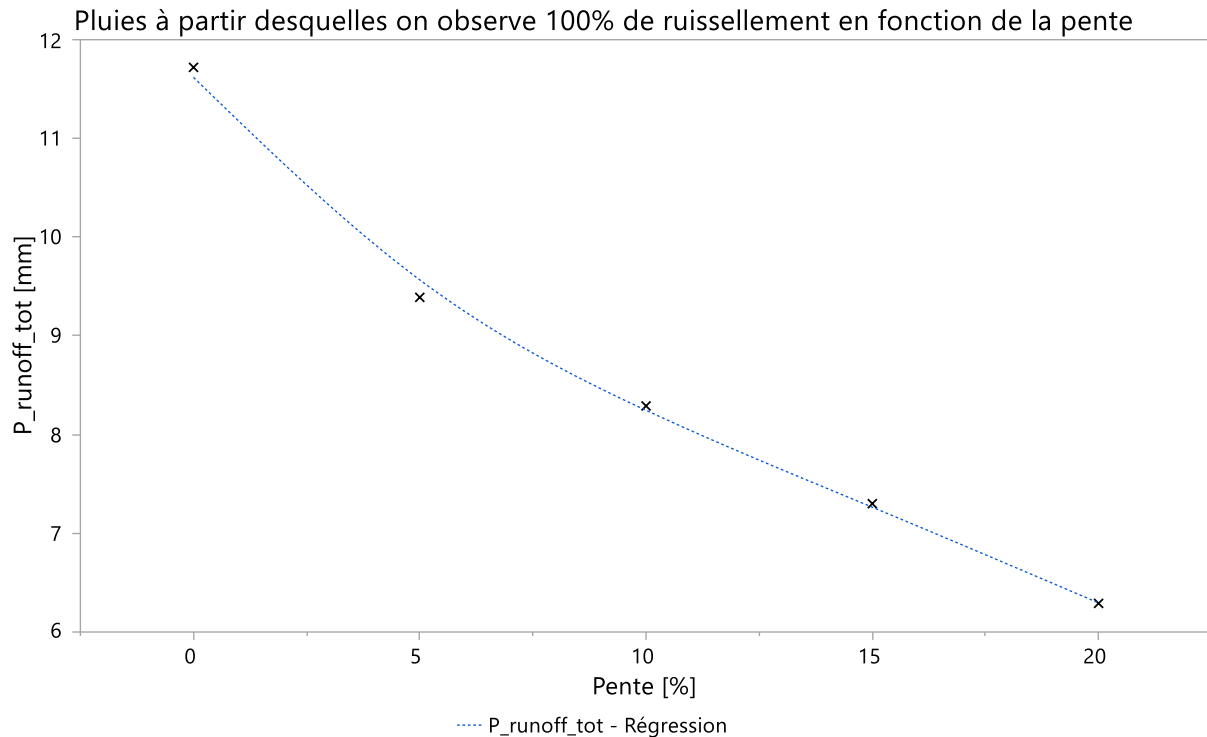


Figure 62: Valeurs de pluies attendues pour observer 100% de ruissellement - Essai de Jurbise.
 P_{runoff_tot} = Pluie attendue avant d'observer 100% de ruissellement.

Pour une parcelle plane, le relief créé par le combiné ERuiStop permet de retenir un peu plus de 7 mm d'eau, et une pluie excédentaire d'au moins 11 mm a pour effet de remplir directement les dépressions et toute l'eau ruissèle alors jusqu'à l'exutoire, en l'absence d'infiltration. Pour une parcelle pentue de 10%, ce qui est fréquemment observé pour une culture de maïs, on n'observe plus que 4.5 mm d'eau environ stockés dans le relief et une pluie de 8 mm suffit à voir apparaître 100 % de ruissellement sur la parcelle. Une parcelle pentue de 20% ne pourrait quant à elle retenir que 3.5 mm d'eau, pour une pluie liée à 100% de ruissellement égale à 6 mm.

Ces chiffres sont globalement positifs et les valeurs de D_s concordent avec les ordres de grandeurs observés récemment (D_s jusqu'à 10 mm selon la pratique culturale) (Kamphorst *et al.*, 2000 ; Peñuela *et al.*, 2013). Les D_s déterminés sont inférieurs aux valeurs de D_s estimées pour le Barbutte (15-20 mm) ou aux D_s estimés en *tied ridging* et *furrow diking* (15-30 mm), car les dépressions créées par le combiné de semis ERuiStop sont bien moins profondes (*cfr.* Fig. 58). Les valeurs de D_s déterminées par Moore et Larson (1979) ou Onstad (1984) ont montré une variabilité plus importante, avec des D_s dépassant les 20 mm pour des parcelles labourées. A nouveau, le relief dans le sol est plus accentué pour cette étude, avec des dépressions pouvant dépasser les 10 cm de profondeur. Ceci peut également être expliqué du fait que le D_s est habituellement déterminé sur base de la rugosité. Une part d'erreur est donc liée à la conversion de cette rugosité en D_s .

Les résultats ne tiennent pas compte de différents facteurs liés aux limitations de l'algorithme. D'une part, celui-ci ne considère pas l'infiltration lors du calcul des volumes d'eau stockés en surface. Boiffin (1988) rappelle notamment que la pression hydrostatique au sein des dépressions favorise l'infiltration. Dès lors, même si les dépressions sont caractérisées avec précision en 3D, les D_s et pluies attendues avant d'observer 100 % de ruissellement sont sous-évalués. Si l'on tient compte de l'infiltration, une partie de la pluie est capable de s'infiltrer au sein de la parcelle et ne contribue donc pas au comblement des dépressions.

D'autre part, l'algorithme ne tient pas compte du temps de transfert, en considérant la vitesse de l'eau comme « infinie » lors de la simulation. L'eau continue indéfiniment de s'écouler tant qu'elle le peut. D'un point de vue physique, cela signifie que la rugosité de surface n'impacte pas la vitesse d'écoulement. En réalité, la rugosité réduit la vitesse d'écoulement à cause des frottements et favorise l'infiltration si l'intensité de la pluie se voit inférieure à la capacité d'infiltration du sol, ce qui n'est pas le cas ici (pour rappel : l'algorithme considère une pluie d'intensité supérieure au taux d'infiltration qui est supposé constant). Dès lors, l'infiltration liée au temps de transfert n'est pas prise en compte non plus. Cependant, les temps de transfert étant faibles sur de courtes parcelles, le temps supplémentaire disponible pour l'infiltration est marginal.

5.4.1.3. Fonctions de connectivité

La figure 63 montre les fonctions de connectivité selon la pente. Elles représentent l'évolution de la part de surface de la parcelle connectée à l'exutoire, en fonction de la capacité de stockage relative de surface.

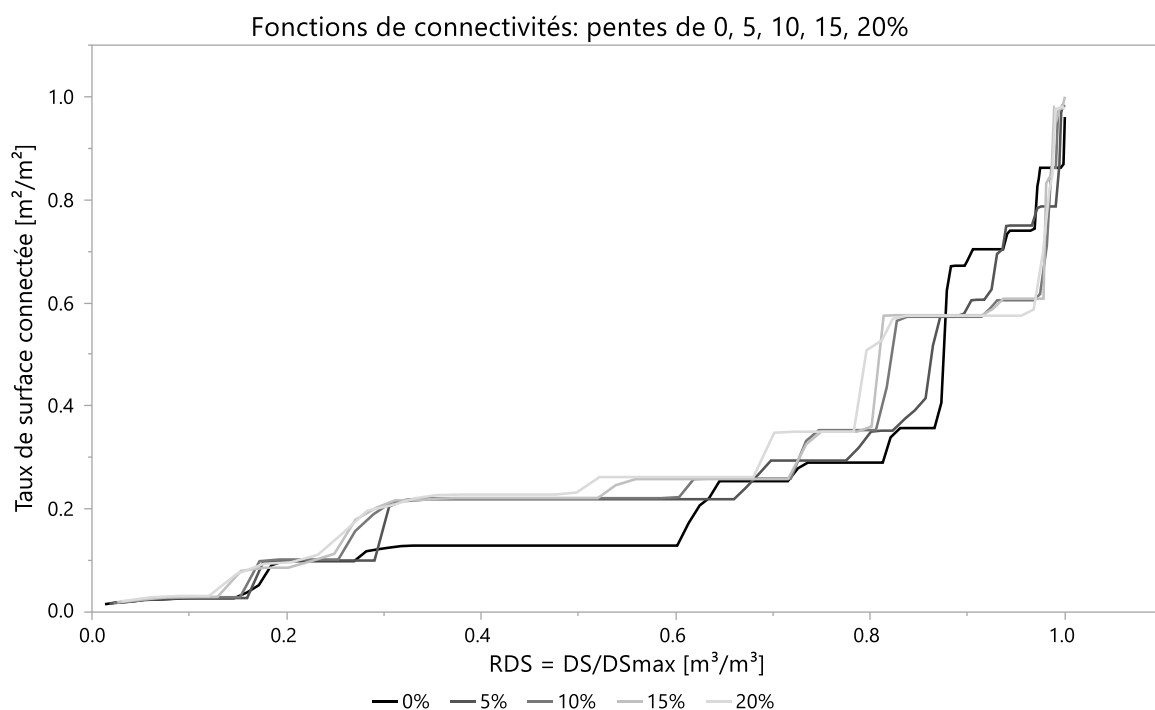


Figure 63: Fonctions de connectivité caractérisant l'essai de Jurbise.

Lorsque la courbe est à plat, cela signifie que le relief est en train de stocker de l'eau. En effet, la part de la capacité de stockage maximale augmente alors que le taux de surface connectée à l'exutoire ne change pas ; les dépressions se remplissent sans que l'eau ne s'écoule vers l'exutoire. Lorsqu'on observe un saut sur la courbe, cela signifie que l'eau déborde d'une ou de plusieurs dépressions pour ruisseler jusqu'à l'exutoire. Le taux de surface connectée augmente alors brusquement. En d'autres termes, le graphe nous permet de visualiser si la connexion entre les eaux en amont et les eaux réceptrices en aval se fait rapidement, et donc à quelle vitesse l'eau de ruissellement est susceptible d'être évacuée de la parcelle. Au plus la courbe est étirée vers la droite, au moins vite la surface sera connectée à l'exutoire. Inversement, au plus la courbe est tirée vers la gauche, au plus vite la surface sera connectée à l'exutoire et du ruissellement sera constaté.

Les résultats observés sont cohérents et l'effet de la pente donne des résultats similaires à ceux observés par Peñuela *et al.* (2015). Au plus la pente est importante, au plus la *RSCf* se voit globalement déplacée vers la gauche, ce qui signifie une connectivité hydrologique plus importante. La surface est plus rapidement connectée à l'exutoire, et du ruissellement sera plus vite observé. Les seuils de connectivité (*connectivity threshold (CT)* = valeur de *RDS* à partir de laquelle le taux de surface connectée commence à augmenter (Peñuela *et al.*, 2015)) sont relativement similaires et ne sont pas observés avant un *RDS* égal 0.1, quelle que soit la pente. L'impact de la pente est tout de même visible. En effet, jusqu'à un *RD* égal à 0.6, le taux de surface connectée est presque le double pour une parcelle pentue. Les observations restent cependant favorables : pour presque 80% de la capacité de stockage maximum du relief, le taux de surface connectée n'excède en aucun cas les 50%.

Dans le cadre du projet ERUISTOP, il est intéressant de remarquer que c'est à 80% de la capacité de rétention maximale que seulement 50% de la surface est connectée à l'exutoire. Cela signifie que l'eau a la possibilité de se stocker longtemps avant de pouvoir ruisseler jusqu'à l'exutoire.

5.4.2. Analyse intra-parcellaire : parcelle de Marbaix

En suivant la même méthodologie que pour l'essai de Jurbise, il a été possible de générer trois MNT issus d'une même parcelle située à Marbaix (Fig. 64). Les 3 MNT montrent une résolution de 3.3 mm, similaire à celle du MNT de Jurbise (Tab. 16).

Tableau 16: Caractéristiques physiques des 3 MNT de Marbaix

MNT	Taille pixel [m]	Superficie MNT [m ²]
Marbaix_1	0.0033	8.95
Marbaix_2		9.44
Marbaix_3		9.13

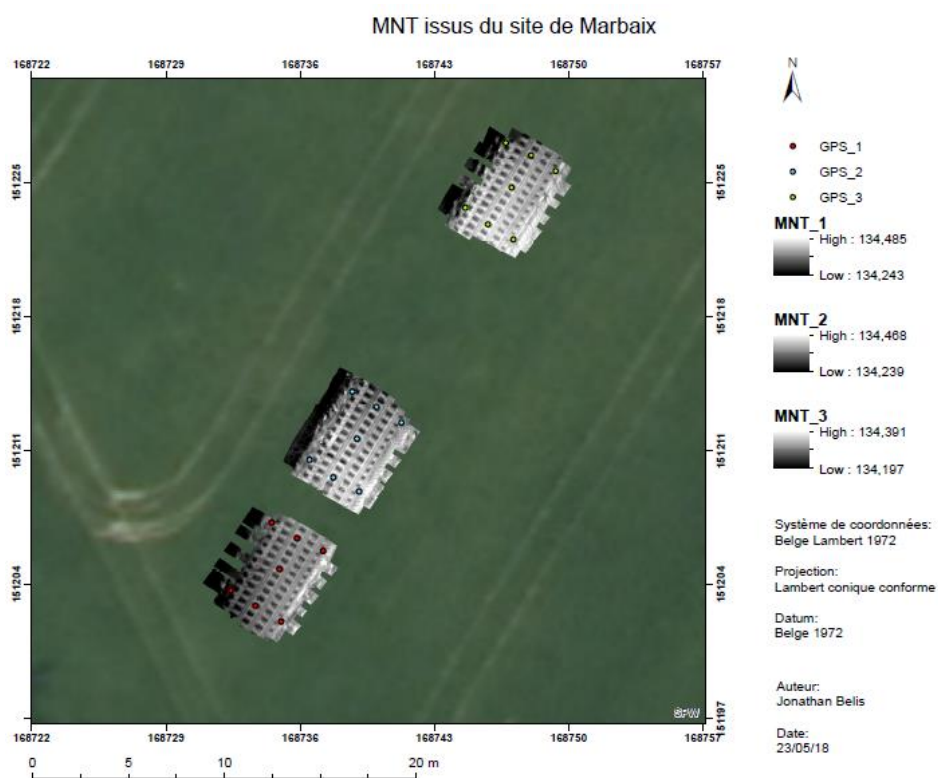


Figure 64: Positionnement des 3 essais de Marbaix et visualisation des MNT bruts obtenus après modélisation dans Agisoft PhotoScan. Les points GPS correspondent aux emplacements des GCP utilisés pour le traitement dans Agisoft PhotoScan.

Le graphe ci-dessous présente les résultats issus de la simulation via l'algorithme de remplissage pour les trois nouveaux MNT : capacité de rétention maximale des dépressions (DS_{max}) en fonction de la pente (Fig. 65).

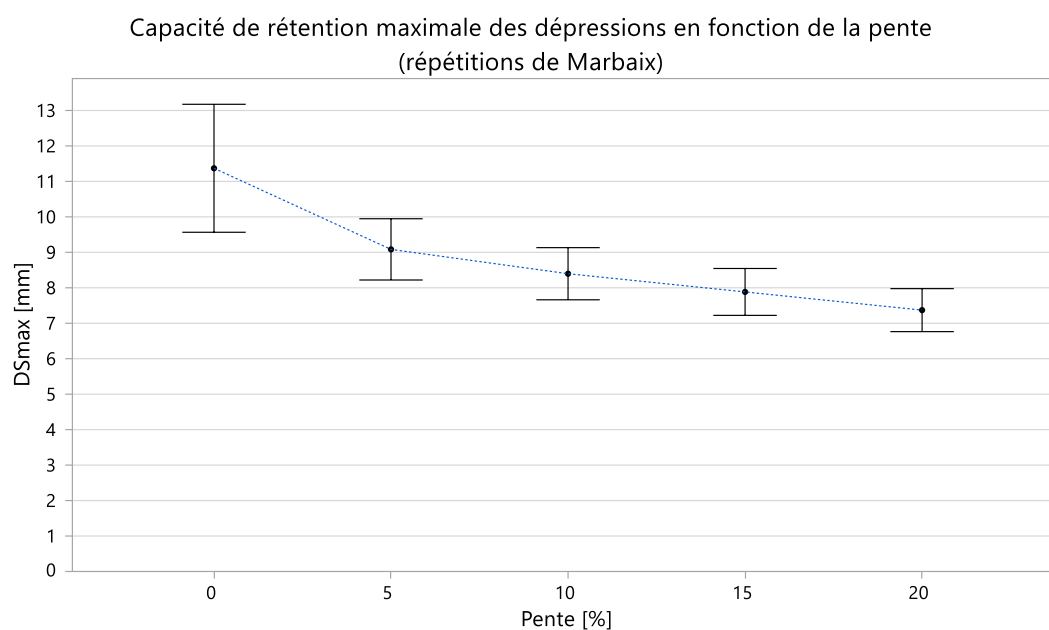


Figure 65: Capacité de rétention maximale des dépressions observée en moyenne sur le site de Marbaix. Les lignes verticales représentent l'écart-type.

On observe de façon attendue que la capacité de stockage des dépressions diminue avec la pente. On remarque cependant que la diminution est plus brutale lorsqu'on passe d'un terrain plat à une pente de 5% (diminution de plus de 2 mm en moyenne) que lorsqu'on passe d'une pente de 5% à 10% (diminution de moins d'1 mm).

La figure 66 nous montre que cette « chute » dans la capacité de rétention peut être due en partie au rôle que jouent les sillons. En effet, en passant d'une pente de 0% à 5%, les sillons retiennent largement moins d'eau.

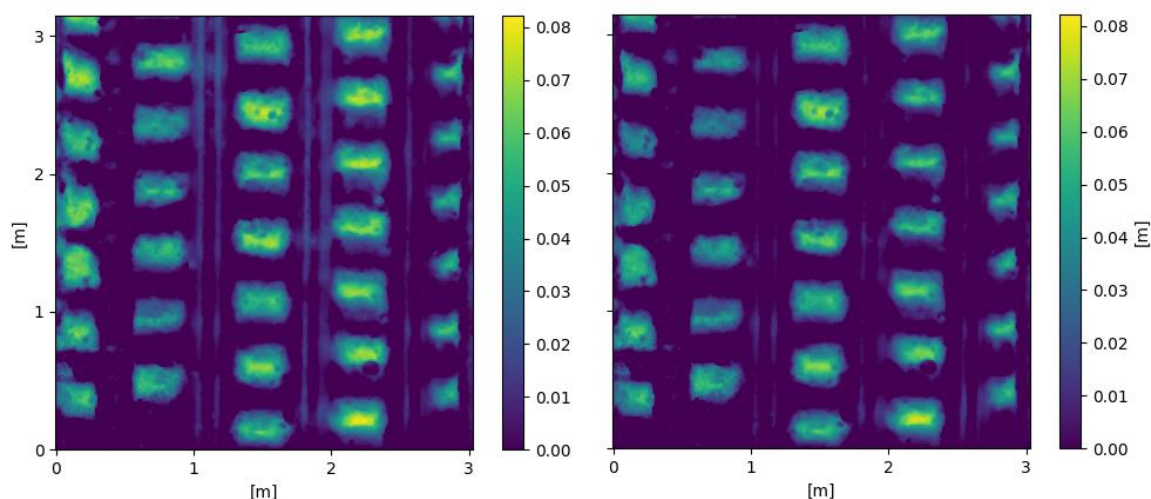


Figure 66: Comparaison de la capacité de rétention maximale entre une pente de 0% (gauche) et de 5% (droite), essai de Marbaix, répétition n°2.

De manière plus globale, on comprend donc que les dépressions (créées par le rouleau) seules ne sont pas responsables de l'entièreté de la rétention de surface de l'eau. Il ne faut cependant pas oublier que le maïs est une plante réputée pour être cultivée sur des terres plus pentues que la norme. Dès lors, cette part du microrelief n'a quasiment plus d'impact sur la rétention en eau.

La figure 67 nous montre comme pour le site de Jurbise la quantité de pluie attendue avant d'observer uniquement du ruissellement. Sans étonnement, on voit que les valeurs diminuent avec une pente croissante. Cette diminution reste toutefois très légère.

L'ensemble des résultats chiffrés sont synthétisés dans le tableau situé en annexe 8.13.

Concernant les fonctions de connectivité, on constate à nouveau un comportement différent pour la 3^{ème} répétition, plus distante des deux autres (Fig. 68). On remarque à nouveau que le comportement des parcelles ne semble pas très différent dès que celles-ci se voient pentues. N'oublions cependant pas que les sillons jouent un rôle dans le DS quand la pente est à plat.

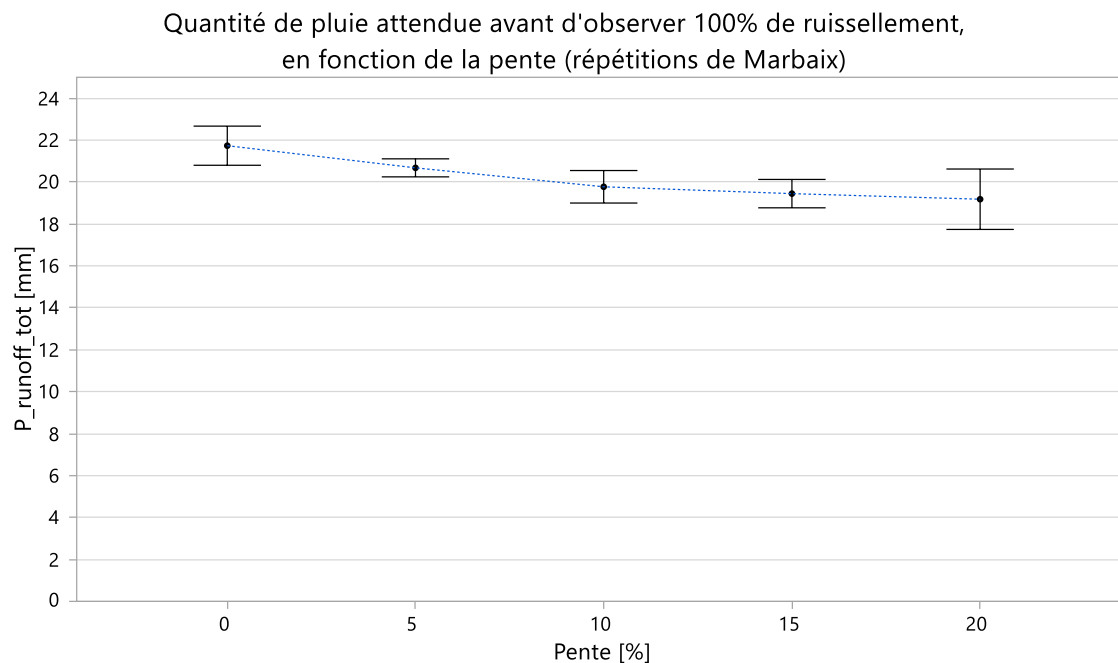


Figure 67: Valeurs de pluies attendues pour observer 100% de ruissellement, en fonction de la pente. Les lignes verticales représentent l'écart-type. P_{runoff_tot} = Pluie attendue avant d'observer 100% de ruissellement.

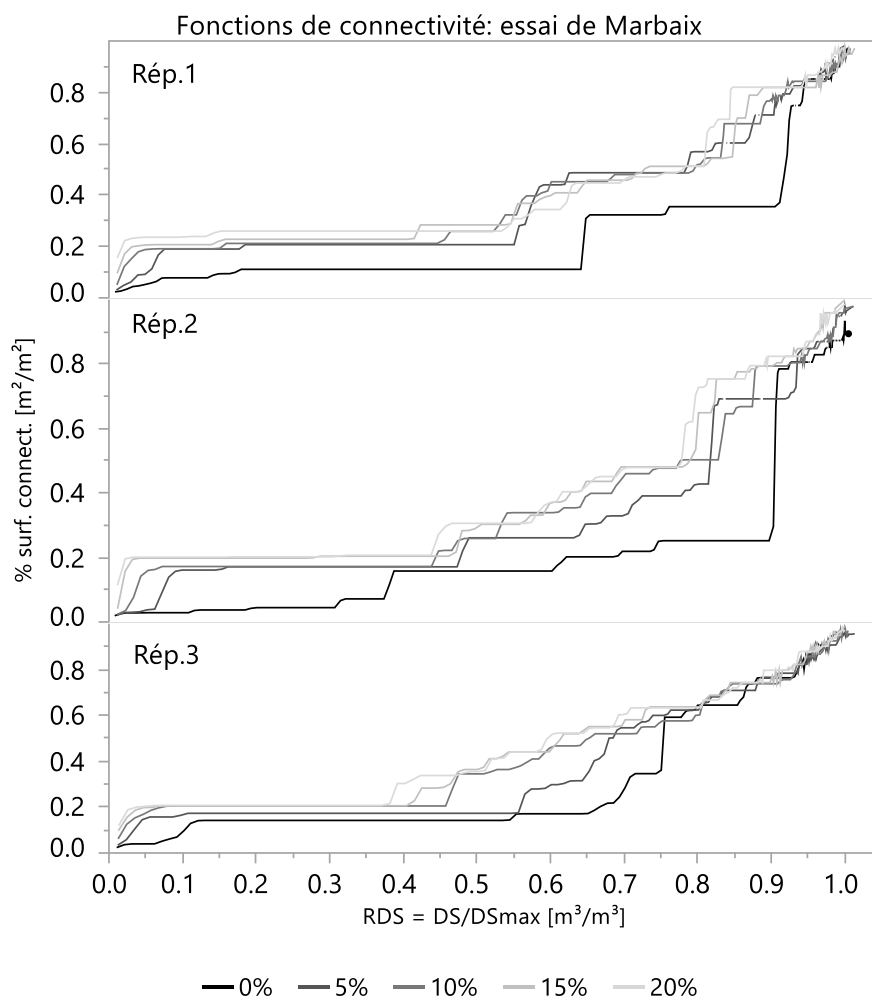


Figure 68: Fonctions de connectivité selon la pente pour les trois répétitions de Marbaix.

5.4.3. Analyse inter-parcellaire

L'analyse inter-parcellaire compare les DSmax entre l'essai de Jurbise d'une part et les répétitions de l'essai de Marbaix d'autre part (Fig. 69). On observe des valeurs globalement plus élevées pour l'essai de Marbaix que pour celui de Jurbise.

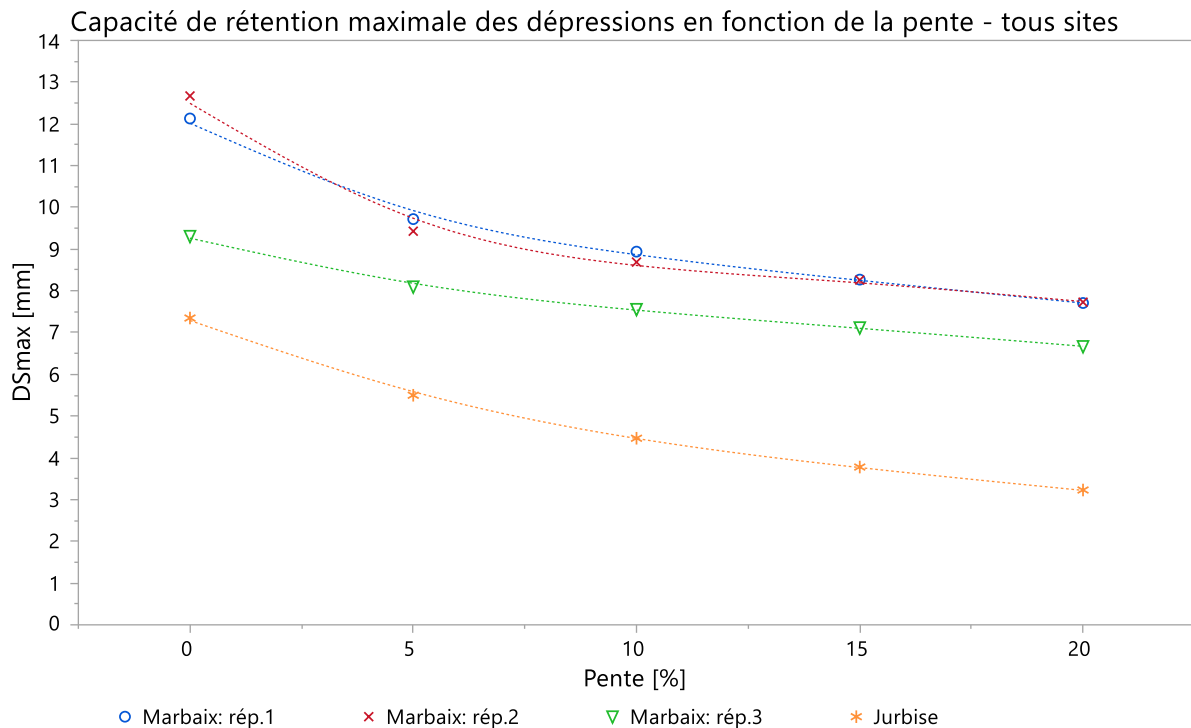


Figure 69: Comparaison des DSmax selon la pente pour toutes les répétitions.

Deux conclusions peuvent être tirées sur base de ces résultats. Premièrement, le graphe illustre bien l'importance de prendre plusieurs mesures lorsqu'on veut étudier une variable. En effet, on peut observer une certaine variabilité entre plusieurs répétitions. Les droites rouges et bleues, correspondant aux DSmax des répétitions 1 et 2 de Marbaix, se confondent presque, ce qui est logique étant donné que les deux MNT sont côte à côte (*cfr.* Fig. 64). Si l'on s'intéresse maintenant à la 3^{ème} répétition effectuée à Marbaix (droite verte), on peut noter des capacités de stockage diminuées de plusieurs millimètres, alors que celle-ci se trouve à peine à 20 m des 2 autres essais. Ceci confirme les observations issues des analyses du ruissellement au §5.2.2. : de la variabilité dans les résultats peut être observée sur des parcelles traitées de manière similaire. Cette première conclusion est d'autant plus vraie si on compare maintenant les essais de Marbaix avec celui de Jurbise. En effet, le graphe montre une nette différence entre le premier essai fait à Jurbise et les 3 autres essais effectués à Marbaix. Pour des MNT de surfaces similaires ($\sim 9\text{m}^2$), on observe pratiquement des valeurs deux fois plus élevées pour le site de Marbaix.

Deuxièmement, on peut poser fortement l'hypothèse que l'état physique du sol des deux sites devait être différent lors du passage du rouleau antiérosif. En effet, les conditions lors de la simulation de l'algorithme de remplissage des MNT pour Jurbise et Marbaix sont rigoureusement les mêmes : les MNT issus des deux sites ont une superficie similaire (le nombre de dépressions au mètre carré est donc le même) et la pente est identique. On devrait donc théoriquement s'attendre à observer de mêmes valeurs. La seule explication à cette différence est que le rouleau a façonné le sol différemment pour les deux sites. Le passage du rouleau sur le site de Marbaix a été plus fortement marqué dans le sol, comme le montre la figure 70 : pour cet essai, les dépressions sont profondes d'environ 10 cm. Ceci est probablement expliqué par le fait que le rouleau était plus enfoncé dans le sol lors de son passage à Marbaix. Même si le DSmax est dès lors plus important, il faut cependant faire attention à ce que la machine ne compacte pas trop le sol. L'infiltration serait largement réduite et la quantité de pluie attendue avant d'observer 100 % de ruissellement serait réduite également.

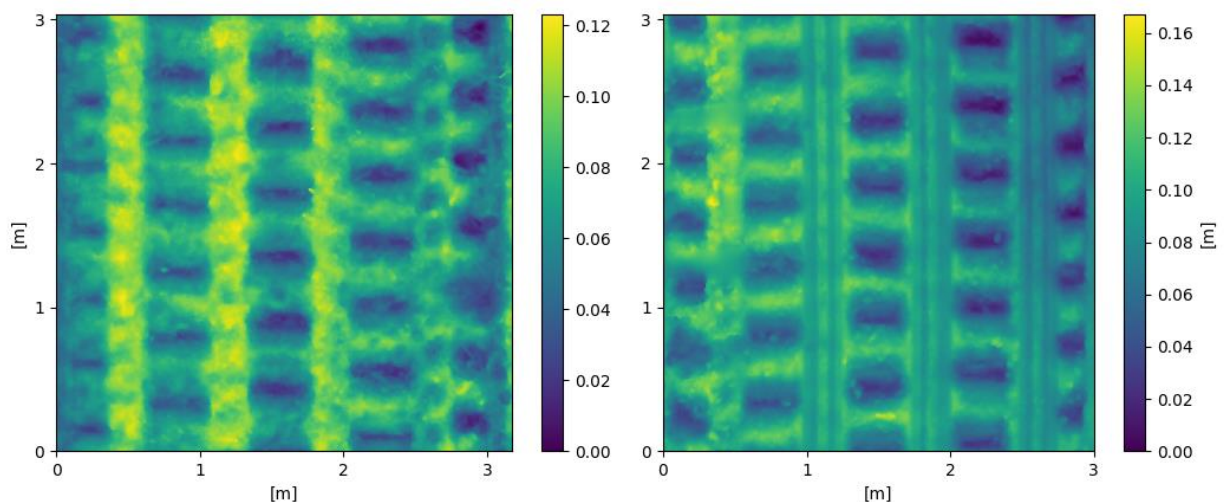


Figure 70: Comparaison entre les MNT de Jurbise (gauche) et Marbaix (droite), pente de 0%.

5.4.4. Erreur sur la photogrammétrie

En calculant les hauteurs moyennes $\mu(h_MNT)$ des objets à partir du MNT (annexe 8.12), on remarque que les 10 boulons et embouts en caoutchouc sont hauts de quelques millimètres au maximum (Tab 17). Ils se confondent presque avec la surface du sol. Les 3 objets plus grands ont quant à eux une hauteur observée sur le MNT plus fidèle et se distinguent d'ailleurs du reste du relief (Fig. 71). Leur hauteur est estimée avec une précision de l'ordre de quelques millimètres. Cet ordre de grandeur s'accorde avec ceux observés actuellement en photogrammétrie rapprochée (Taconet et Ciarletti, 2007 ; Aguilar *et al.*, 2009 ; Peter Heng *et al.*, 2010 ; Nouwakpo *et al.*, 2010).

Tableau 17: Comparaison entre les hauteurs réelles (h) et hauteurs issues du MNT (h_{MNT}). La moyenne μ et l'écart-type σ^2 des h_{MNT} sont également fournis. Δh représente l'erreur liée à la modélisation.

	h [cm]	$\mu (h_{MNT})$ [cm]	$\sigma^2 (h_{MNT})$ [cm]	$\Delta h = h - \mu (h_{MNT}) $ [cm]
Boulon	1.17	0.33	0.14	0.84
Embout caoutchouc	3.04	0.57	0.26	2.47
Carré plat	1	1.08	0.07	0.08
Petit cylindre	2.96	2.57	0.02	0.39
Grand cylindre	6.03	6.16	0.17	0.13

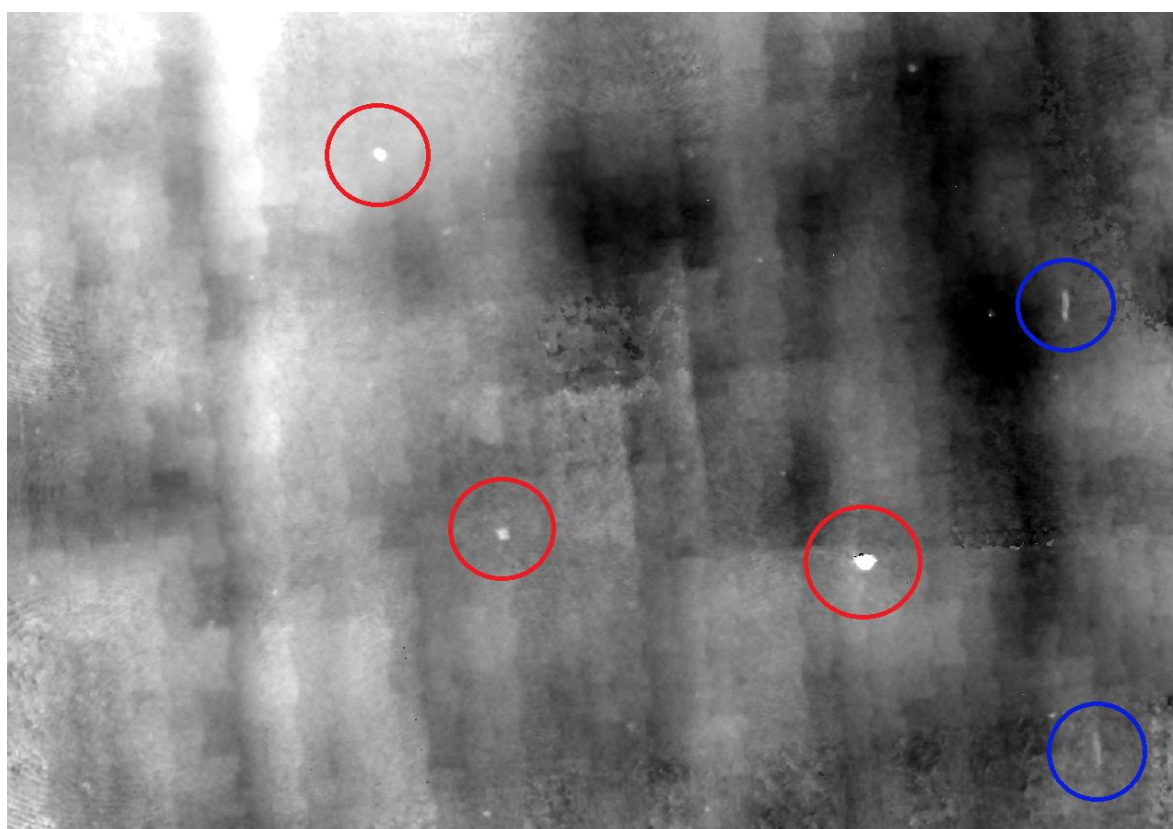


Figure 71: Vue détaillée des 3 objets sur le MNT issu du test relatif à l'estimation de l'erreur liée à la photogrammétrie. Les 3 objets volumineux sont entourés en rouge. Les GCP visibles sont entourés en bleu.

L'erreur sur l'estimation de la hauteur des boulons est presque aussi importante que leur taille. Les embouts en caoutchouc sont quant à eux estimés avec une erreur dépassant les 2cm. Une hypothèse permettant d'expliquer ces différences est que les trois objets plus volumineux montrent une largeur plus importante que les boulons et embouts en caoutchouc. Ceux-ci seraient alors trop petits pour être distingués lors du recouvrement des photos. Cependant, les photographies montrent une résolution au sol de 0.863 mm/pixel. Le nombre de pixels semble donc suffisant pour caractériser et distinguer tous les objets placés au sol, même les boulons. On remarque d'ailleurs que les GCP ou même les joints entre les pavés sont modélisés et visibles sur le MNT (cfr. Fig. 71). Cette hypothèse est donc écartée.

Une seconde hypothèse plus pertinente peut expliquer ces observations. Alors qu'il est conseillé d'éviter des objets brillants ou sans texture lors de la prise de photos (Agisoft LLC, 2017), les objets utilisés possèdent en partie ces caractéristiques : les boulons en acier sont légèrement brillants et les embouts en caoutchouc sont noirs et mates. Il est donc probable que le logiciel n'ait pu, sous des angles différents, associer et faire correspondre les pixels correspondants. On peut cependant noter que le carré plat, également brillant, montre un résultat probant. L'hypothèse n'est donc pas écartée et la mise en œuvre d'autres essais permettrait de la vérifier.

5.5. Discussion générale des résultats

L'efficacité du combiné de semis ERuiStop est indiscutable. Cependant, certains résultats sont à prendre avec précaution et méritent d'être discutés. Deux incertitudes sont liées aux résultats faisant intervenir les données pluviométriques. D'une part, il faut tenir compte du fait que les pluies de la PAMESEB ne sont corrélées qu'à 60% avec celles recensées sur le terrain par le CIPF. Dès lors, les résultats liés à la probabilité d'observer du ruissellement ou encore l'estimation du CN se voient attribuer une erreur non négligeable. D'autre part, un biais supplémentaire est dû à l'analyse des pluies de la PAMESEB. Toutes les intensités ont été analysées, pour chaque jour de chaque mois concerné. La méthodologie utilisée pour définir la probabilité d'observer du ruissellement comporte ainsi une part d'incertitude. En effet, pour les événements non ruisselants, on est certain que l'intensité maximale (ou le cumul pluviométrique) n'a pas provoqué de ruissellement. A l'inverse, pour les événements ruisselants, rien n'affirme que l'événement qui a été considéré comme à l'origine du ruissellement était le seul événement ruisselant au sein du cumul. Dès lors, il se peut que la valeur des pluies journalières ait été sous-estimée, entraînant une incertitude supplémentaire. Ces biais pourraient expliquer en partie les différences entre les seuils de ruissellement et la probabilité d'observer du ruissellement sur le site d'Ottignies (cfr. §5.2.1.1).

Certains biais impactent les résultats liés au D_s déterminé par l'algorithme de remplissage. En effet, certaines propriétés du sol ne sont pas retranscrites lors des simulations. La totalité de la dynamique de l'eau sur la parcelle n'est donc pas prise en compte pour l'obtention des résultats. L'infiltration, qui dépend de la texture du sol, n'est pas considérée lors des simulations. De plus, la rugosité favorise également l'infiltration en impactant la vitesse de ruissellement de l'eau.

Une autre limite à cette modélisation concerne l'état physique des dépressions et leur évolution avec le temps. En début de saison, les dépressions dessinées par le rouleau sont intactes et peu érodées ; la capacité de stockage est maximale. Au fur et à mesure que la saison avance, les buttes sont érodées et se dégradent. Ghuza (2003) a effectivement montré que le D_s est fortement réduit avec le temps et la pluviométrie. Eimberck (1990) insiste particulièrement sur l'impact de la pluie sur l'abaissement du microrelief. La capacité de stockage diminue lentement et on s'attend donc à voir un ruissellement plus important. Les

études du Barbutte ont d'ailleurs montré qu'en quelques semaines, la capacité de rétention en eau diminue en début de culture puis se stabilise. Des pertes de 25 et 40% sont estimées sur pentes faible et forte respectivement (Agr'Eau, s.d.). Cependant, en cours de saison, le couvert végétal se développe : le maïs « forme ses lignes ». Pour rappel, la végétation permet d'intercepter la pluie et de réduire la vitesse d'écoulement, conduisant à une meilleure infiltration (*cfr.* §2.3.4). Au plus la saison est avancée, au plus le ruissellement se verrait dans ce cas limité. Ces deux facteurs (dégradation des dépressions et formation des lignes du maïs) impactent directement le ruissellement, mais ne sont pas pris en compte dans la simulation. Les résultats présentés ne semblent donc valables qu'en début de saison, lorsque le climat n'a pas encore pu impacter le microrelief du sol, et que le couvert végétal ne s'est pas encore développé.

Concernant les résultats issus des MNT, ceux-ci montrent des différences entre un terrain à plat ou un terrain présentant une pente, quelle que soit sa valeur. Cela ne montre finalement que peu d'importance, car le maïs est rarement observé sur un terrain plat. On peut toutefois considérer ces résultats comme concluants : puisque le D_s ne varie que très peu selon la pente, cela signifie que celle-ci ne montre qu'un faible impact sur cette variable, et que les effets du combiné ne seront pas impactés si on passe d'une parcelle de 5% à une parcelle de 10%. Cette hypothèse devrait être confirmée avec des essais supplémentaires.

6. Conclusions et perspectives

L'ensemble des résultats se sont montrés très positifs concernant l'efficacité du combiné de semis ERuiStop. L'analyse des données a tout d'abord démontré que son utilisation permet de réduire le ruissellement et les pertes en terre de 55.96% et 85.90% respectivement. Le rouleau semble donc plus performant en termes de réduction d'érosion plutôt que de ruissellement. Afin d'optimiser la gestion du ruissellement résiduel, des aménagements hydrauliques en aval peuvent être mis en place, comme des fascines ou fossés à redents, afin de protéger les habitations (GISER, 2016). Une première estimation des CN en parcelles agricoles pour l'utilisation du combiné ERuiStop est désormais disponible, permettant une éventuelle application en modélisation hydrologique. Les CN démontrent également l'impact favorable du combiné ERuiStop sur le ruissellement en parcelles agricoles. Les probabilités d'observer du ruissellement ont finalement démontré que l'utilisation du combiné ERuiStop ne semble pas impacter l'occurrence du ruissellement mais bien les volumes de ruissellement recensés. Des études supplémentaires, basées sur des jeux de données plus fournis et comportant plus de pluies ruisselantes et non ruisselantes, permettraient de vérifier cela.

Ensuite, la caractérisation des dépressions s'est montrée très précise via le principe de photogrammétrie rapprochée. Sur base de l'algorithme de remplissage, les *Ds* calculés ont montré des valeurs très favorables, variant entre 3 et 7 mm pour l'essai de Jurbise ou 7 et 12 mm pour l'essai de Marbaix, alors que l'infiltration n'est même pas considérée. Les *Ds* mais également les fonctions de connectivité ont permis de montrer que la parcelle, une fois pentue, ne montre plus d'importantes différences quant à son comportement face au ruissellement. En revanche, la pente ne semble que peu impacter la quantité de pluie attendue avant d'observer 100 % de ruissellement.

L'algorithme comporte certaines limites discutées précédemment. Celui-ci pourrait être légèrement amélioré, notamment afin de prendre en compte l'infiltration, sur base des facteurs qui l'influencent : texture et porosité, épaisseur de la couche de sol et pente de la parcelle, temps de simulation, etc.

La variation dans le temps de la capacité de rétention n'a de façon générale pas pu être étudiée. La dégradation des dépressions avec le temps impacterait pourtant la capacité d'eau stockée en surface. Dès lors, un monitoring des dépressions et leur *Ds* peut s'avérer intéressante. Les dégradations des dépressions au cours de la saison pourraient être chiffrées et il serait possible de voir si ces dégradations pourraient être contrecarrées par le développement du couvert végétal.

Enfin, les recherches montrent que la photogrammétrie rapprochée est une méthode rapide et efficace, très prometteuse dans le domaine des sciences environnementales. Les MNT générés présentent une excellente résolution et sont facilement exploitables pour l'étude de paramètres hydrologiques.

7. Références bibliographiques

7.1. Livres et articles scientifiques

Abd Elbasit M.A.M., Anyoji H., Yasuda H., Yamamoto S., 2009. Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification. *Hydrological Processes*, **23** : 1408–1417. DOI: 10.1002/hyp.7263.

Aguilar M.A., Aguilar F.J., Negreiros J., 2009. Off-the-shelf laser scanning and close-range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief. *Biosystems Engineering* **103**: 504-517. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.02.010

Amede T., Menza M., Awlachev S.B., 2011. Zai improves nutrient and water productivity in the Ethiopian highlands. *Experimental Agriculture* **47** (S1): 7-20. DOI: 10.1017/S0014479710000803.

Antoine M., Javaux M., Bielders C., 2009. What indicators can capture runoff-relevant connectivity properties of the microtopography at the plot scale? *Advances in Water Resources*, **32**: 1297– 1310.

Antoine M., Chalon C., Darboux F., Javaux M., Bielders C., 2012. Estimating changes in effective values of surface detention, depression storage and friction factor at the interrill scale, using a cheap and fast method to mold the soil surface micro-topography. *Catena*, **91** : 10-20. DOI : 10.1016/j.catena.2010.11.003.

Araya A., Stroosnijder L., 2010. Effects of tied ridges and mulch on barley (*Hordeum vulgare*) rainwater use efficiency and production in Northern Ethiopia. *Agricultural Water Management* **97** : 841-847. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.01.012.

Baize D., Darboux F., 2013. *Tests de stabilité structurale, de percolation et d'évaluation de la sensibilité à la battance.* Chapitre 15. In : Denis Baize, Odile Duval, Guy Richard (Eds.), *Les sols et leurs structures : Observations à différentes échelles* (p. 215-225). Synthèses (Quae), pp. 263.

Bielders C., Ramelot C., Persoons E., 2003. Farmer perception of runoff and erosion and extent of flooding in the silt-loam belt of the Belgian Walloon Region. *Environmental Science & Policy*, **6**: 85–93.

Boardman J., Poesen J., 2006. Soil Erosion in Europe. *John Wiley & Sons Ltd*, pp.855.

Boiffin J., Papy F., Eimberck M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. – Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie, EDP Sciences*, **8** (8) : 663-673.

Blanco H., Lal R., 2010. Principles of Soil Conservation and Management. *Springer*, pp.617.

- Bracken L.J., Croke J., 2007.** The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, **21**: 1749-1763. DOI: 10.1002/hyp.6313.
- Bruneau P., Gascuel-Oudou C., 1990.** A morphological assessment of soil microtopography using a digital elevation model on one square meter plots. *Catena* vol. 17: 315-325.
- Critchley W., Siegert K., Chapman C., Finkel M., 1991.** Water harvesting. A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, pp.154.
- Croke J., Mockler S., Fogarty P., Takken I., 2005.** Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology*, **68** : 257–268. DOI : 10.1016/j.geomorph.2004.11.020.
- Darboux F., Algayer B., 2013.** *Croûtes de battance, ruissellement, érosion hydrique*. Chapitre 10. In : Denis Baize, Odile Duval, Guy Richard (Eds.), *Les sols et leurs structures : Observations à différentes échelles* (p. 141-153). Synthèses (Quae), pp. 263.
- De Ploey J., 1990.** *La conservation des sols*. La Recherche, **227**, Suppl. 6 : 111-122.
- Eimberck M., 1990.** *Facteurs d'érodibilité des sols limoneux : Réflexions à partir du cas du Pays de Caux*. Cahiers ORSTOM – Pédologie, Vol. XXV, (1-2) : 81-94 .
- Farahani S.S., Fard F.S., Asoodar M.A., 2016.** Effects of Contour Farming on Runoff and Soil Erosion Reduction: A Review Study. *Elixir Agriculture* **101** : 44089-44093.
- El-Swaify S.A., Dangler E.W., Armstrong C.L., 1982.** *Soil Erosion by Water in the Tropics*. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, pp.173.
- Guzha A.C., 2003.** Effects of tillage on soil microrelief, surface depression storage and soil water storage. *Soil & Tillage Research* **76** : 105-114. DOI:10.1016/j.still.2003.09.002.
- Gillijns K., Govers G., Poesen J., Mathijs E., Biielders C., 2005.** *Erosion des sols en France – Etat de la question*. Institut royal pour la Gestion durable des Ressources naturelles et la Promotion des Technologies propres (IRGT), Cahier n°10, pp.73.
- Greco J., 1978.** *La défense des sols contre l'érosion*. La Maison Rustique, pp.183.
- Hairsine P.B., Moran C.J., Rose C.W., 1992.** Recent developments regarding the influence of soil surface characteristics on overland flow and erosion. *Australian Journal of Soil Research*, **30** (3): 249-264.
- Hawkins R.H., Ward T.J., Woodward D.E., Van Mullem J.A., 2009.** Curve Number Hydrology: State of the Practice. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, pp. 106.
- Helming K., Jeschke W., Storl J., 1992.** *Surface reconstruction and change detection for agricultural purposes by close range photogrammetry*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, XVIIth Congress vol. XXIX, part B5: 610-617.

- Hudson N., 1981.** Soil Conservation. *Batsford Academic and Education Ltd*, pp.324.
- Jones, O.R., Clark R.N., 1987.** Effects of furrow dikes on water conservation and dryland crop yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51**: 1307-1314.
- Jones O.R., Baumhardt R.L., 2003.** Furrow Dikes. In: Stewart BA, Howell TA (Eds.), *Encyclopedia of water science*. Marcel Dekker, Inc.: 317-320.
- Kamphorst, E.C., Jetten, V., Guerif, J., Pitkanen, J., Iversen, B.V., Douglas, J.T., Paz, A., 2000.** Predicting depressional storage from soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am J.*, **64** : 1749-1758.
- Kraus, K., Waldhäusl, P., 1998.** Manuel de Photogrammétrie. Principes et procédés fondamentaux (Traduction de Pierre Grussenmeyer and Olivier Reis). *Éditions Hermès* , vol.1 : pp. 407.
- Malagnoux M., 2008.** Degraded arid land restoration for afforestation and agro-silvo-pastoral production through new water harvesting mechanized technology. In: Lee C., Schaaf T. (Eds.), *The Future of Drylands*. Springer, pp. 269-282.
- Martin P., Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Ligneau L., Ouvry J-F., 1997.** Mesures du ruissellement et de l'érosion diffuse engendrés par les pratiques culturales en Pays de Caux (Normandie)/Measurement of runoff and interrill erosion generated by cultivation practices in the Pays de Caux (Normandie). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 3 (2) :143-154.
- Mirzaei M.R., Ruy S., Ziarati T., 2012.** Monitoring of soil roughness caused by rainfall using stereo-photogrammetry. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*. Vol. 3 (2), 322-338.
- Moore I.D., Larson C.L., 1979.** Estimating microrelief surface storage from point data. *Trans. ASAE*, **22**: 1073-1077.
- Morgan R.P.C., 1995.** Soil Erosion & Conservation – Second Edition. *Longman*, pp.198.
- Morin J., Rawitz E., Benyamini Y., Hoogmoed W.B., Etkin H., 1984.** Tillage practices for soil and water conservation in the semi-arid zone. II. Development of the basin tillage system in wheat fields. *Soil and Tillage Research* **4**: 155-164.
- Neff E.L., 1973.** Water Storage Capacity of Contour Furrows in Montana. *Journal of Range Management* **26** (4) : 298-301.
- Nouwakpo S., Huang C.H., Frankenberger J., Bethel J., 2010.** A simplified close range photogrammetry method for soil erosion assessment. *Joint Federal Interagency Sedimentation and Hydrologic Modeling*.
- Onstad C.A., 1984.** Depressional storage on tilled soil surfaces. *Trans. ASAE*, **27**: 729-732.
- Ouedraogo, A., Sawadogo, H. 2000.** Three models of extension by farmer innovators in Burkina Faso. *LEISA (ILEIA Newsletter for low external input and sustainable agriculture)* **16** (2): 21-22.

Ouvry J-F., 1990. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré. Expérience du Pays de France (France). *Cahiers ORSTOM - Pédologie*, vol. XXV (1-2) : 157-169.

Peter Heng B.C. Chandler J.H., Armstrong A., 2010. Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies. *The Photogrammetric Record* **25** (131): 240-265.

Panagos P., Standardi G., Borrelli P., Lugato E., Montanarella L., Bosello F., 2017. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *Land Degradation Development*, **29** : 421-444.

Peñuela A., Javaux M., Bielders C., 2013. Scale effect on overland flow connectivity at the plot scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17** (1) : 87-101. DOI:10.5194/hess-17-87-2013.

Peñuela A., Javaux M., Bielders C., 2015. How do slope and surface roughness affect plot-scale overland flow connectivity? *Journal of Hydrology*, **528** : 192-205.

Peñuela A., Darboux F., Javaux M., Bielders C., 2016. Evolution of overland flow connectivity in bare agricultural plots. *Earth Surface Processes and Landforms*, **41** (11) : 1595-1613.

Pimentel D., Allen J., Beers A., Guinand L., Linder R., McLaughlin P., Meer B., Musonda D., Perdue D., Poisson S., Siebert S., Stoner K., Salazar R., Hawkins A., 1986. World food economy and the soil erosion crisis. *Environmental Biology Rept.* 86-2.

Pimentel D., Allen J., Beers A., Guinand L., Linder R., McLaughlin P., Meer B., Musonda D., Perdue D., Poisson S., Siebert S., Stoner K., Salazar R., Hawkins A., 1987. World Agriculture and Soil Erosion. *Bioscience*, **37**: 277-283.

Pimentel D., Harvey C., Resosudarmo P., Sinclair K., Kurz D., McNair M., Crist S., Shpritz L., Fitton L., Saffouri R. Blair R., 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, Vol.267 : 1117-1123.

Poesen J., 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In: Wicherek, S. (Eds.), *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. Elsevier : 221-339.

Rémy J-C., Marin-Lafliche A., 1974. L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Anales agronomiques*, **25** (4) : 607-632.

Roose E., 1996. Land Husbandry – Components and strategy. *FAO Soils Bulletin* 70.

Roose E., Kaboré V., Guenat C., 1993. Le Zai. Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cahiers ORSTOM – Pédologie*, vol. XXVIII (2) : 159-173.

Roose E., Kabore V.,Guenat C., 1999. Zai Practice: A West African Traditional Rehabilitation System for Semiarid Degraded Lands, a Case Study in Burkina Faso. *Arid Soil Research and Rehabilitation* **13** (4): 343-355. DOI: 10.1080/089030699263230.

Shaxson F., Barber R., 2003. Optimizing Soil Moisture for Plant Production. The significance of soil porosity. *FAO Soils Bulletin* 79.

Sheng T.C., 1981. The need for soil conservation structures for steep cultivated slopes in the humid tropics. In: Lal R., Russel E.W. (Eds). *Tropical agricultural hydrology*. Wiley, pp.357-372.

Taconet O., Ciarletti V., 2007. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. *Soil & Tillage Research* **93** : 64–76.
DOI:10.1016/j.still.2006.03.018.

Toy T., Foster G., Renard K., 2002. Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control. *John Wiley & Sons, Inc.*, pp.338.

Unger P.W., Kirkham M.B., Nielsen D.C., 2010. Water conservation in Agriculture. In: Zobeck T. M., Schillinger W.F. (Eds). *Soil and Water Conservation Advances in the United States*. Soil Science Society of America Special Publication **60**, pp.301.

Verstraeten G., Poesen J., Goossens D., Gillijns K., Bielders C., Gabriels D., Ruyschaert G., Van Den Eeckhaut M., Vanwallegghem T., Govers G., 2006. Belgium. In: Boardman, J., Poesen, J. (Eds.), *Soil Erosion in Europe*. Wiley, pp. 385–411.

Wendt R.C., Alberts E.E., Hjelmfelt Jr. A.T., 1986. Variability of Runoff and Soil Loss from Fallow Experimental Plots. *Soil Science Society of America Journal* **50** (3) : 730-736.

Woodward D.E., Hawkins R.H., Jiang R., Hjelmfelt A.T., Van Mullem J.A., Quan D. Quan Q.D., 2003. Runoff Curve Number Method : Examination of the initial abstraction ratio. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, pp. 10.

Zougmore R., Zida Z., Kambou N.F., 2003. Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso. *Soil & Tillage Research* **71**: 143-149.

Zougmore R., Jalloh A., Tioro A., 2014. Climate-smart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: a review of evidence and analysis of stone bunds and zaï techniques. *Agriculture & Food Security* **3**: 16.

7.2. Documents et pages WEB

AGRESTE, 2010. *Grandes cultures – Panorama*. In: AGRESTE, Les Dossiers, n°8, : 7-12.

AGRESTE : Paris, France. En ligne :

http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/file/dossier8_cultures_panorama.pdf.

Agr'Eau, s.d. *Stop au ruissellement ! FIWAP asbl* : Gembloux, Belgique. En ligne :

<http://www.agreau.be/uploads/documents/29//fiwap-ruissellementdef1-4.pdf>

Agisoft LLC, 2017. *Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 1.3*. Agisoft

LLC : St. Pétersbourg, Russie. En ligne : http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_3_en.pdf

CIRAD, 2014. *Analyse granulométrique par sédimentation : Méthode à la pipette sur granulomètre automatique*. CIRAD : Paris, France. En ligne : <https://us-analyses.cirad.fr/media/fichiers/catalogue-des-analyses-courantes6>

GISER, 2016. *Bonnes pratiques pour la gestion du risque de ruissellement en zone rurale*. Convention GISER : Jambes, Belgique. En ligne : <http://www.giser.be/wp-content/uploads/2016/10/Giser-brochure-FINAL-partie2.pdf>

INRA, 2014. *L'agriculture de conservation : faut-il labourer le sol ?* INRA : Paris, France. En ligne : <http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Agroecologie/Tous-les-dossiers/L-agriculture-de-conservation/Erosion-des-sols-et-agriculture-de-conservation>

IRM, 2018a. *Été 2014*. IRM : Bruxelles, Belgique. En ligne : <https://www.meteo.be/meteo/view/fr/14656660-Ete+2014.html>. Mis à jour le 7/02/2014.

IRM, 2018b. *Les violents orages du 23 juin 2016*. IRM : Bruxelles, Belgique. En ligne : <https://www.meteo.be/meteo/view/fr/27017721-Les+violents+orages+du+23+juin+2016.html>

PAMESEB, 2009. *Pluviomètres du réseau PAMESEB*. Asbl Pameseb: Libramont, Belgique. En ligne : https://www.pameseb.be/meteo_intro/infos_techniques/precipitations.html

PROTECT'eau, 2014. *Le cloisonnement des interbuttes. Une technique efficace pour lutter contre le ruissellement en culture de pomme de terre*. PROTECT'eau : Namur, Belgique. En ligne : http://www.phyteauwal.be/data/620160427_Ruissellement%20Pdt%20JPGOFFART.pdf

PROTECT'eau, 2018. *Le Mag' n°2 : Dossiers Engrais de ferme et Diguettes ainsi que le reportage « REs'eau »*. PROTECT'eau : Namur, Belgique. En ligne : https://protecteau.be/resources/shared/publications/Le%20Mag/PE_Mag02.pdf

Région Wallonne, s.d. *Portail WALCORS*. En ligne : <http://gnss.wallonie.be/walcors/reseau-walcors.html>

RTBF, 2014. *Inondations : le niveau de crues a dépassé trois mètres par endroits*. RTBF: Bruxelles, Belgique. https://www.rtbf.be/info/regions/detail_intemperies-la-commune-de-glabbeek-egalement-touchee-par-des-inondations?id=8324862

SPW, 2018. *L'agriculture wallonne en chiffres 2018*. In : SPW. *Evolution de l'économie agricole et horticole de la Wallonie 2018*. SPW Éditions : Jambes, Belgique. En ligne : <https://agriculture.wallonie.be/documents/20182/21858/FR-2015.pdf/591e9fba-0df8-43a3-ac3a-042aeb83714c>

SPW - DGO3 - DEMNA - DEE, 2017. *Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017 (REEW 2017)*. SPW Éditions : Jambes, Belgique. En ligne : <http://etat.environnement.wallonie.be/files/Publications/REEW2016/DGRNE-16-16716-REEW%202016-sl-051217-prod2%20-%20basse%20r%C3%A9solution.pdf>

USDA, 2009. *It pays to furrow dike*. USDA-ARS : Washington DC, USA. En ligne: <https://www.ars.usda.gov/news-events/news/research-news/2009/it-pays-to-furrow-dike/>. Mis à jour le 22/08/2017.

USDA-ARS, 2016. En ligne : <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/dawson-ga/national-peanut-research-laboratory/docs/production-research/page-3/>. Mis à jour le 13/08/2016.

7.3. Documents non publiés

CIPF, 2013. *Evaluation de l'efficacité de techniques innovantes de préparation du sol dans la lutte contre le ruissellement et l'érosion en culture de maïs sur terres en pente*. Rapport d'activités. CIPF, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Etude du combiné de semis ERuiStop dans la lutte contre l'érosion en culture de maïs

Présenté par Jonathan Belis

Résumé L'érosion hydrique des sols constitue une menace présente partout dans le monde, dont les effets peuvent induire de lourdes conséquences. La culture du maïs présente un risque érosif accru, mais occupe cependant une part importante dans l'agriculture en Belgique, notamment en région limoneuse. C'est dans ce contexte que le CIPF a développé le combiné de semis ERuiStop, outil permettant de lutter contre l'érosion en créant des dépressions dans l'interligne du maïs.

Dans cette étude, l'efficacité du combiné de semis ERuiStop est analysée sur base de données de ruissellement et de concentrations en sédiments recensées par le CIPF. Les dépressions créées par le combiné de semis sont caractérisées grâce à un MNT généré par photogrammétrie rapprochée. Leur capacité de rétention en eau est ainsi déterminée grâce à un algorithme de remplissage.

L'analyse des données a démontré que le combiné de semis ERuiStop permet de réduire, en moyenne pour tous les essais, le ruissellement et les pertes en terre de 55.96% et 85.90% respectivement. Des informations pratiques telles que les seuils de ruissellement ou encore la probabilité d'observer du ruissellement selon l'intensité maximale de la pluie ou la pluviométrie journalière sont apportées. Une estimation des CN pour les parcelles agricoles travaillées par le combiné est également réalisée.

La capacité de rétention en eau des dépressions varie de 3 à 7 mm ou 7 à 12 mm selon la pente et selon les essais. La hauteur au sol du combiné lors de son passage explique la différence de capacité de rétention entre les essais. Les fonctions de connectivité permettent finalement de caractériser le comportement hydrologique de parcelles travaillées par le combiné ERuiStop.

L'ensemble des résultats démontrent tous l'efficacité du combiné de semis ERuiStop, qui permet de diminuer le ruissellement et d'autant plus les pertes en terre. L'utilisation de photogrammétrie rapprochée pour la génération de MNT s'est montrée très précise et efficace. Une amélioration de l'algorithme, qui ne tient pas compte de l'infiltration, pourrait cependant permettre de déterminer avec plus d'exactitude la capacité de rétention des dépressions. Il serait également intéressant d'effectuer un monitoring des dépressions pour analyser l'évolution de leur capacité de rétention au cours de la saison culturale.

Mots-clés

érosion, maïs, photogrammétrie rapprochée, *depression storage*