

Faculté des bioingénieurs

Sécheresse et rendement en culture de maïs : Analyse de l'impact du rouleau anti-érosif en Wallonie

Auteur : Dorian Hennion

Promoteur : Charles Bielders (UCL/ELI/ELIE)

Lecteurs : Pierre Bertin (UCL/ELIA/IBST),
Joost Wellens (Agro-Bio Tech, département GxABT)

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

Année académique 2023-2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers mon promoteur M. Charles Bielders pour son encadrement et sa bienveillance tout au long de l'année. Monsieur Bielders s'est montré disponible et professionnel durant toute la réalisation de ce travail, en proposant notamment des réunions quasiment hebdomadaires et en me mettant en contact avec les personnes adéquates quand j'éprouvais des difficultés envers certains points.

J'aimerais également remercier M. Joost Wellens pour avoir pris le temps de regarder à la manière d'implémenter les micro-dépressions dans Aquacrop, il s'est montré également très ouvert en me proposant de relayer mes questions à Dirk Raes, un des développeurs d'Aquacrop.

Je souhaiterais ensuite remercier Timothée Clément pour m'avoir fourni des informations précieuses sur les essais du rouleau anti-érosif grâce aux rapport du CIPF et à son étude, ainsi que pour son expertise sur l'aspect durabilité des micro-dépressions. Merci également à Valéry Michaud d'Agromet pour m'avoir accordé l'accès aux conditions météorologiques des 25 dernières années pour la station de Louvain-La-Neuve.

Enfin, un tout grand merci à mes grands amis de cours Yvan, Bastien, François et Eliot ainsi qu'à ma famille pour leur soutien durant la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Etat de l'art	3
2.1 La sécheresse	3
2.1.1 Définitions et typologies	3
2.1.2 Causes de la sécheresse	5
2.1.4 La sécheresse agricole.....	5
2.1.3 Conséquences de la sécheresse agricole	6
2.2 La sécheresse en Europe	8
2.2.1 Historique.....	8
2.2.2 Tendances actuelles et prévisions.....	11
2.3 La sécheresse en Belgique	12
2.4 Le water harvesting	13
2.4.1 Principes.....	13
2.4.2 Méthodes de micro-captage in situ par modification du microrelief.....	15
2.5 Le rouleau anti-érosif en culture de maïs en Wallonie.....	20
3. Objectifs.....	22
4. Matériels et méthodes	23
4.1 Aquacrop.....	23
4.1.1 Présentation du modèle.....	23
4.1.2 Paramètres du modèle	24
4.2 Implémentation du rouleau anti-érosif dans Aquacrop et détermination de la relation du curve number en fonction de la pente	30
4.2.1 Le Curve number	30
4.2.2 Détermination d'un curve number spécifique à la Wallonie	32
4.2.3 Calcul du CN du rouleau en fonction de la pente	33
4.2.4 Relation du CN en fonction de la pente pour le rouleau anti-érosif « amélioré »...	36
4.3 Les scénarios simulés.....	37
5 Résultats et discussions	42
5.1 Comparaison rendements du CIPF et simulations Aquacrop	42
5.1.1 Résultats	42
5.1.2 Discussions	49

5.2 Différence de CN entre le rouleau anti-érosif et le témoin	51
5.2.1 Résultats.....	51
5.2.2 Discussions	52
5.3 Comparaison rouleau anti-érosif/témoin	53
5.3.1 Résultats.....	53
5.3.2 Discussions	58
5.4 Rendement du maïs en fonction du CN du témoin et du rouleau	59
5.4.1 Résultats.....	59
5.4.2 Discussions	67
5.5 Discussions générales	69
6. Conclusion et perspectives	71
7. Références bibliographiques	73
8. Annexes	80

Liste des figures

Figure 1 : Relations entre les 4 grands types de sécheresses (Thibaut et Catas, 2020).....	4
Figure 2 : part des coûts dues aux sécheresses liées aux différents secteurs en Europe en 2015 (à gauche) et pour une projection en 2100 (à droite) (Naumann et al. 2021)	7
Figure 3 : Les régions d'Europe selon Ionita et Nagavciuc (2021).....	8
Figure 4 : Évolution temporelle du pourcentage de la superficie touchée par les sécheresses en région Méditerranéenne selon les indices de sécheresse (a) SPEI12, (b) SPI12 et (c) scPDSI (Ionita et Nagavciuc, 2021).....	9
Figure 5 : Évolution temporelle du pourcentage de la superficie touchée par les sécheresses en Europe centrale selon les indices de sécheresse (a) SPEI12, (b) SPI12 et (c) scPDSI (Ionita et Nagavciuc, 2021)	9
Figure 6 : Évolution temporelle du pourcentage de la superficie touchée par les sécheresses en Europe du Nord selon les indices de sécheresse (a) SPEI12, (b) SPI12 et (c) scPDSI (Ionita et Nagavciuc, 2021)	10
Figure 7 : Fréquence décennale de la durée des sécheresses modérées, avec un seuil comme étant le 25 ^e percentile pour les précipitations et les températures de l'air moyennes (Ionita et Nagavciuc, 2021)	10
Figure 8 : Classification des méthodes de water harvesting selon l'ICARDA (Safriel et Sliman 2007).....	14
Figure 9 : Création de zaï au Burkina Fasso (IUCN, 2017)	16
Figure 10 : Digues semi-circulaires. A gauche : schéma représentant les digues semi-circulaire (Greener Land, 2024). A droite : digue semi-circulaire en place dans le bassin Tanin (Sambalino et Steenbergen 2012).....	16
Figure 11 : Schéma de contour bunds (Critchley et al., 2013)	17
Figure 12 : Negarim (Pradhan et Sahoo, 2019)	17
Figure 13 : Technique du tie-ridging. A gauche, schéma explicatif du tie-ridging utilisé en région semi-aride (Anschütz et al., 2003). A droite, image représentant le furrow diking après un évènement pluvieux dans les grandes plaines Américaine (USDA, 2009).....	18
Figure 14 : Cloisonnement des interbuttes en pommes de terre. A gauche, photo des micro-bassins après un évènement pluvieux, à droite photo des micro-bassins au moment du semi (SPW, 2020).....	19
Figure 15: A gauche, photo de la French Barbutte Cottard (Olivier et al., 2014). A droite, photo du Dyker de Grimme (Protect'EAU, 2018).	19
Figure 16 : Micro-dépressions créées par le combiné Eruistop. A gauche au moment du semi, à droite après un évènement pluvieux (CIPF, 2024b)	20
Figure 17 : A gauche, le combiné Eruistop, composé d'un semoir de précision, d'une rotative et d'un rouleau anti-érosif. A droite, le rouleau anti-érosif créant les dépressions. (CIPF, 2023)	21
Figure 18 : Carte des principaux types de sols de Wallonie à 1:250.000 (WalOnMap, 2024) 26	
Figure 19 : Données de ruissellement pluvial mesurées et curves numbers pour les nombres médians de courbes ajustées ($\lambda = 0,05$), pour les traitements de contrôle et les traitements au rouleau dans la culture du maïs. Les valeurs de ruissellement mesurées sont des	

moyennes sur l'ensemble des répétitions de parcelles. Les barres d'erreur correspondent aux écarts types. Les points sans barres d'erreur correspondent à des expériences sur une seule parcelle (sans répétitions). Seuls les événements pluvieux > 5 mm ont été pris en compte. (Clément et al., 2023)	33
Figure 20 : Capacité de rétention maximale des micro-dépressions (D _{max}) en fonction de la pente. Cette relation a été obtenue en simulant la quantité d'eau maximale pouvant être stocké dans les dépressions pour 5 pentes simulées, elle correspond au site de Jurbise dans l'étude de Bélis (2018)	34
Figure 21 : Graphique représentant la relation du D _{max} en fonction de la pente de l'étude de Bélis et la relation du D _{max} « ajusté » pour l'étude de Clément et al. (2023). Le rapport entre les 2 courbes est de 0,55.	35
Figure 22 : Capacité de rétention maximale des dépressions pour des micro-cuvettes de 10cm de profondeur. les lignes verticales représentent l'écart-type. Ce graphique représente les résultats pour les répétitions de Marbaix dans l'étude de Bélis (2018)	37
Figure 23 : Matrice exprimant la différence de rendement pour différents CN sous forme de pourcentage pour un même type de sol. Le sol considéré est ici un sol argileux en année sèche.....	40
Figure 24 : Scénarios du second sous-objectif	41
Figure 25 : Comparaison du ruissellement (en L/m ²) entre le témoin et le rouleau anti-érosif pour le projet CIPF et les simulations Aquacrop entre 2013 et 2016. Le ruissellement est mesuré sur la période comprise entre l'implémentation des micro-dépressions et la récolte de la culture.....	43
Figure 26 : Comparaison du pourcentage de diminution du ruissellement (en L/m ²) entre le témoin et le rouleau anti-érosif pour le projet CIPF et les simulations Aquacrop entre 2013 et 2016. Le ruissellement est mesuré pour la période comprise entre l'implémentation des micro-dépressions et la récolte de la culture.....	43
Figure 27 : Comparaison entre les rendements fourragers (biomasse totale du maïs) du rouleau anti érosif et du témoin pour différents sites entre les essais CIPF et les simulations Aquacrop. Les écart-types sont construits sur base de la moyenne des essais. Les données proviennent du rapport du CIPF 2017.....	44
Figure 28 : Comparaison entre les rendements en maïs fourrager simulés par Aquacrop (pour des sols de 1,6 mètre d'épaisseur) et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF pour des sites de la région limoneuse en Wallonie par année (entre 16 et 42 sites en fonction des années).	45
Figure 29 : Comparaison entre les rendements en maïs fourrager simulés par Aquacrop pour des sols d'épaisseur 1,6 mètre et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF pour des sites de la région limoneuse de la Wallonie (entre 16 et 42 en fonction des années) entre 2007 et 2023.....	46
Figure 30 : Comparaison entre les rendements en maïs fourrager simulés par Aquacrop pour des sols de 1,6 mètre d'épaisseur et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF pour des sites de la région limoneuse de la Wallonie (entre 16 et 42 selon les années) en fonction de la pluviométrie entre 2007 et 2023. La pluviométrie est calculée sur toute la période de simulation.	46

Figure 31 : Comparaison entre les rendements simulés par Aquacrop pour des sols d'épaisseur de 1,6 mètre d'épaisseur et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF pour des sites (entre 12 et 26 en fonction des années) de la région de sablo-limoneuse en Wallonie.....	47
Figure 32 : Comparaison entre les rendements en maïs fourrager simulés par Aquacrop pour des sols d'épaisseur 1,6 mètre et les rendements moyens observés par le CIPF pour des sites de la région limoneuse de la Wallonie (entre 12 et 26 en fonction des années) entre 2007 et 2023.....	47
Figure 33 : Comparaison entre les rendements simulés par Aquacrop pour des sols d'épaisseur 1,6 mètre et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF en fonction de la pluviométrie pour des sites de la région de sablo-limoneuse en Wallonie entre 2007 et 2023.....	48
Figure 34 : Curve number pour une culture de maïs en fonction de la pente pour un sol témoin, un sol ayant subi un passage au rouleau anti-érosif « classique » (micro-dépression de 6 cm de profondeur) et un sol ayant subi un passage au rouleau anti-érosif avec des micro-dépressions de 10 cm de profondeur.	51
Figure 35 : Comparaison des rendements en biomasse (correspondant au maïs fourrager) pour le rouleau anti-érosif et pour le témoin en fonction de l'épaisseur du sol pour les 3 catégories d'années (années sèches, humides et à déficit hydrique prolongée). Les rendements sont moyennés pour des pentes variant entre 0 et 15%.....	53
Figure 36 : Comparaison du ruissellement pour le rouleau anti-érosif et pour le témoin en fonction de l'épaisseur du sol pour les différentes catégories d'années (années sèches, humides et à déficit hydrique prolongée). Le ruissellement est moyenné pour des pentes variant entre 0 et 15%.	54
Figure 37 : Moyennes des rendements fourragers pour le rouleau anti-érosif et le témoin en fonction de la pente pour les différentes catégories d'années. Le rendement est moyenné sur des sols d'une épaisseur allant de 1,6 mètre à 0,8 mètre	55
Figure 38 : Moyennes des ruissellement pour le rouleau anti-érosif et le témoin en fonction de la pente pour les différentes catégories d'années.	55
Figure 39 : Rendement du rouleau anti-érosif et du témoin (triangle rouge) et du rouleau (croix orange) en fonction de l'indice de réserve hydrique des 9 années simulés moyennés pour des sols limoneux de 1,6 mètre, 1,2 mètre, 1,6 mètre à charge caillouteuse et 1,2 mètre à charge caillouteuse pour des sols à pente de 10%. Les barres d'erreurs horizontales représentent les écarts-types de l'indice de réserve hydrique pour les différents sols et les barres d'erreurs verticales représentent les écart-types du rendement pour différents sols. 56	
Figure 40 : Ruissellement du rouleau anti-érosif et du témoin en fonction de l'indice de réserve hydrique des 9 années simulées pour des sols limoneux de 1,6 mètre, 1,2 mètre, 1,6 mètre à charge caillouteuse et 1,2 mètre à caillouteuse pour des sols à pente de 10%.....	57

Figure 41 : Rendement en fonction du curve number pour différentes années simulées pour des sols limoneux de 1,2 mètre (traits pleins) et 0,8 mètre (traits pointillés) d'épaisseur.	60
Figure 42 : Ruissellement en fonction du curve number pour différents scénarios simulés sur sols limoneux. Les ruissellements des différents scénarios sont les moyennes pour chaque année des sols simulés de 1,2 et 0,8 m d'épaisseur avec et sans charge caillouteuse. Les ruissellements étant très proches pour les différents sols, les barres d'erreurs (écart-types) ne sont pas visibles sur le graphique.....	60
Figure 43 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number du sol obtenu après le passage du rouleau pour différentes valeurs de curve number initial (témoin) représentées par les différentes couleurs. Ces graphiques illustrent le pourcentage supplémentaire de rendement obtenu pour une année sèche (2022) sur sol limoneux pour des sols d'épaisseur de 1,2 mètre et de 0,8 mètre avec ou sans charge caillouteuse.....	61
Figure 44 : Rendement en maïs fourrager pour 3 années à déficits hydriques prolongés (40, 80 et 120 jours après le semis) en fonction du curve number pour des sols limoneux. Chaque année est simulée pour des sols de 1,2 et 0,8 mètre de profondeur.	62
Figure 45 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number des parcelles traitées au rouleau anti-érosif et pour différentes valeurs du curve number des parcelles témoins pour les 3 années à déficit hydrique prolongé (40, 80 et 120 jours après le semis) sur sol limoneux pour des sols d'épaisseur de 1,2 mètre, de 0,8 mètre.	63
Figure 46 : Rendement en fonction du curve number pour les sols sablo-limoneux pour les trois catégories d'années simulées (année sèche, à déficit hydrique prolongé et humide) et deux épaisseurs de sol (1,6 et 1,2 mètre).	64
Figure 47 : rendements en fonction du curve number pour les sols argileux pour 3 années simulées (année sèche, à déficit hydrique prolongé et humide) et 2 épaisseurs (1,6 et 1,2 mètre).	65
Figure 48 : ruissellement en fonction de la valeur du curve number pour les sols argileux pour les 3 catégories d'années simulées (année sèche, à déficit hydrique prolongé et humide) et 2 épaisseurs de sol (1,6 et 1,2 mètre).	65
Figure 49 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du CN pour une année sèche sur sol argileux.	66
Figure 50 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du CN pour une année à déficit hydrique prolongé sur sol argileux.	66
Figure 51 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du CN pour une année normale sur sol argileux.	66
Figure 52 : Exemple de résultats d'un scénario de l'objectif 1	85
Figure 53 : Synthèse des scénarios simulés pour le sous objectif 1 et 2.....	86
Figure 54 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number pour 3 années à déficit hydrique prolongé (40,80 et 120 jours après le semis) sur sol limoneux pour des sols d'épaisseur de 1,2 mètre, de 0,8 mètre, des sols à charge caillouteuse et de 1,2 et 0,8 mètre d'épaisseur.	88
Figure 55 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number pour une année normale sur sol limoneux pour des sols d'épaisseur de 1,2 mètre, de 0,8 mètre, des sols de 1,2 mètre à charge caillouteuse et des sols de 0,8 mètre à charge caillouteuse.	88
Figure 56 : ruissellement en fonction du curve number pour les sols sablo-limoneux	89

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques du sol « Siltloam » du modèle de simulation Aquacrop	25
Tableau 2 : KSat et CN par défaut pour les différents groupes hydrologique du sol.....	31
Tableau 3 : Revenus supplémentaires par hectare générés par l'utilisation du rouleau pour les scénarios dits « intéressants » en sol limoneux.	68
Tableau 4 : Revenus supplémentaires par hectare générés par l'utilisation du rouleau pour les scénarios dits « intéressants » en sol argileux	68
Tableau 5 : Dsmax en fonction de la pente ajusté pour l'étude de Clément et al. (2023)	82
Tableau 6 : Curve number du témoin en fonction de la pente pour l'étude de Clément et al. (2023)	82
Tableau 7 : abstractions initiales du témoin en fonction de la pente pour l'étude de Clément et al. (2023)	83
Tableau 8 : Curve number du témoin en fonction de la pente pour l'étude de Clément et al. (2023)	83
Tableau 9 : Curve number du témoin et du rouleau « 10 centimètres » en fonction du CN...	84
Tableau 10 : pluviométrie, température et rayonnement des différentes années simulées entre le 25 février et le 02 octobre	84
Tableau 11 : réserve utile du sol en fonction de l'épaisseur et de la charge caillouteuse d'un sol	85

Liste des acronymes

AMC	Conditions antécédente d'humidités du sol
CIPF	Centre Indépendant de Promotion Fourragère
CN	Curve number
DSmax	Maximum depression storage
ETo	Evapotranspiration de référence
TAW	Eau totale disponible
USDA	United States Department of Agriculture

1. Introduction

Au cours des dernières années, l'Europe occidentale a été confrontée à une augmentation notable de la fréquence (Spinoni et al., 2015) et de l'intensité (Grillakis, 2019) des épisodes de sécheresse. Ces phénomènes climatiques ont des répercussions significatives sur les rendements de nos cultures, engendrant un impact économique estimé à 9 milliards d'euros par an pour l'Europe (Naumann et al., 2021).

En Wallonie, cette tendance se manifeste également, avec sept années de sécheresse reconnues comme calamité agricole depuis le début du XXI^{ème} siècle. Par ailleurs, le changement climatique projette une aggravation de ces phénomènes, avec des épisodes de sécheresse plus longs, plus intenses et plus fréquents en Europe occidentale (European Commission, 2020 ; Spinoni et al. 2018).

Les régions historiquement touchées par ces phénomènes ont développé, au fil des siècles, des techniques agricoles afin de limiter leurs effets. Parmi ces techniques, un large ensemble de méthodes connues sous le nom de 'water harvesting' (collecte des eaux de ruissellement), qui englobe les pratiques de récupération et de gestion des eaux de précipitation et de ruissellement locales, permet de réduire le déficit hydrique des cultures en augmentant la disponibilité de l'eau (WOCAT, 2012; Salazar et Casanova, 2011).

Ces techniques jouent sur différents facteurs clés tel que l'amélioration de l'infiltration (Yang Wu et al., 2015), la diminution du ruissellement (Komariah et Masateru Senge, 2013) ou l'optimisation de la gestion de l'eau collectée, ce qui permet de diminuer le stress hydrique des cultures. La collecte des eaux de ruissellement a pour objectif d'améliorer l'efficacité de son utilisation par les cultures en stockant l'eau lorsqu'elle est abondante et en la rendant disponible lorsqu'elle est rare (FAO, 2024a). Elle permet d'augmenter la quantité d'eau stockée dans le sol (FAO, 2024a).

Parallèlement aux sécheresses qui la touche, la Wallonie fait également face à des phénomènes d'érosion hydrique importants qui réduisent la fertilité des sols agricoles et peuvent provoquer des dommages environnementaux importants en aval. Pour lutter contre ces érosions, diverses techniques peuvent être mises en œuvre. Parmi celles-ci figurent par exemple l'agriculture de conservation, les techniques culturales sans labour, l'implantation de bandes enherbées ou de cultures anti-érosives comme le miscanthus, la culture sous couvert ou le strip-till (CIPF, 2024a).

Récemment, des méthodes jouant sur la modification du micro-relief en champ en préparation de semis, tel que l'implantation de micro-dépressions par le rouleau anti-érosif en maïs ou le cloisonnement des interbuttes en pomme de terre pour lutter contre l'érosion, ont suscité un intérêt croissant. Ces techniques jouent, tout comme les techniques de water harvesting évoquées précédemment, sur la collecte des eaux de pluie et de ruissellements. Le rouleau anti-érosif permet, d'après une étude du CIPF (Centre Indépendant de Promotion Fourragère) menée entre 2012 et 2019, de diminuer en moyenne l'érosion de 83% et le ruissellement de 69% (Clément et al., 2023).

Le maïs est une culture qui favorise l'érosion - l'érosion hydrique atteint des taux de 14 tonnes par hectare et par an en Belgique (Bélis, 2018) - mais c'est également une culture relativement sensible à la sécheresse, qui engendre dans certains cas des impacts économiques considérables (Singh et al., 2023; Poudel, 2023). En Wallonie, des pertes importantes de rendements sont observées sur des sols à mauvaise rétention en eau lors d'années plus sèches (Lambert et al., 2020).

La culture de maïs est donc confronté à un double défi, à savoir l'érosion lors de fortes précipitations et la diminution de rendements en cas de précipitations insuffisantes. Dans ce contexte, il convient de s'interroger sur la capacité des micro-dépressions, créées par le rouleau anti-érosif, à atténuer le stress hydrique en année sèche, de par leur capacité à augmenter la disponibilité de l'eau.

Ce mémoire cherchera à évaluer l'effet du rouleau anti-érosif sur le bilan hydrique des sols en année sèche en Wallonie pour la culture de maïs, afin de déterminer son impact sur la réduction des pertes de rendements. Le modèle de simulation de croissance de culture Aquacrop sera utilisé à cette fin et permettra d'évaluer le potentiel intérêt de cette technique dans la résilience de nos cultures face aux changements climatiques.

2. Etat de l'art

2.1 La sécheresse

2.1.1 Définitions et typologies

La sécheresse est définie comme une "absence prolongée ou un déficit marqué de précipitation entraînant une pénurie d'eau pour une activité ou un groupe donné ou provoquant un grave déséquilibre hydrologique" selon le quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2007). Cependant, le terme de sécheresse peut être lié à différents aspects selon qu'il concerne la pluviométrie, l'agriculture ou l'état des nappes phréatiques et des cours d'eau. Ainsi, on retrouve 4 types de sécheresses selon l'organisation mondiale météorologique (IPCC, 2007; Thibaut et Ozer, 2021; Van Loon, 2015) :

- La sécheresse météorologique, qui correspond à un déficit prolongé des précipitations.
- La sécheresse agricole, qui est liée à des déficits de teneur en eau du sol et qui affecte les cultures.
- La sécheresse hydrologique, qui est liée à des débits de cours d'eau, des niveaux de lacs et de nappes phréatiques inférieurs à la normale.
- La sécheresse socio-économique, qui survient lorsque les pénuries d'eau commencent à affecter les populations et que l'approvisionnement en eau disponible ne peut satisfaire les besoins en eau de l'homme et de l'environnement.

Les différentes sécheresses sont liées (figure 1) et ont pour causes communes un déficit prolongé en précipitations (Van Loon, 2015). Elles impliquent une multitude de processus (Ionita et Nagavciuc, 2021), ont des répercussions sur plusieurs disciplines (Thibaut et Ozer, 2021) et sont difficiles à caractériser du fait de la lenteur d'apparition des « symptômes » (Ault, 2020). Notons que la sécheresse hydrologique se développe plus lentement que la sécheresse météorologique et agricole, car elle implique notamment les recharges souterraines. La sécheresse socio-économique découle directement des autres types de sécheresses (Trenberth et al., 2014).

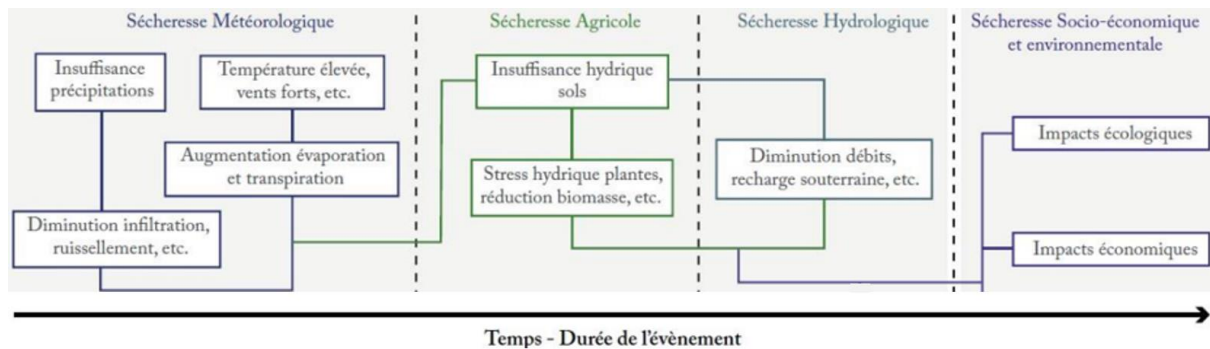


Figure 1 : Relations entre les 4 grands types de sécheresses (Thibaut et Catas, 2020)

La sécheresse se caractérise par trois aspects principaux : la durée, la couverture spatiale et l'intensité (Dai, 2011). L'intensité est le degré de déficit des précipitations, de la teneur en eau du sol ou du stockage d'eau (Dai, 2011). Ces trois aspects se mesurent généralement de manière relative, la sécheresse étant une condition relative, plutôt qu'absolue, du système hydrologique (Van Loon, 2015). Parmi les mesures relatives permettant de la quantifier, on retrouve fréquemment l'indice standardisé des précipitations (SPI), l'indice standardisé d'évapotranspiration-précipitations (SPEI) et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) (Ionita et Nagavciuc 2021). L'indice standardisé des précipitations exprime la pluviométrie réelle en tant qu'écart standardisé par rapport à la fonction de distribution de la probabilité des précipitations (Kumar et al., 2009). L'indice standardisé d'évapotranspiration-précipitations a été développé par Vicente-Serrano et al. (2010). Il est défini comme la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle et a pour but de normaliser les anomalies du bilan hydrique climatiques cumulées. Il est plus complet que le SPI car il prend en compte plus de conditions atmosphériques pouvant affecter la gravité de la sécheresse, telles que la température, la vitesse du vent et l'humidité (Stagge et al., 2014). Enfin, l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer a pour objectif d'évaluer et de comparer la sévérité de la sécheresse dans le temps et l'espace. Il est calculé en utilisant la température, les précipitations, la latitude du lieu et la capacité en eau disponible du sol. La base du PDSI repose sur la différence entre la quantité de précipitations nécessaire pour maintenir un équilibre hydrique normal et les précipitations réelles (Wells et al., 2004). Les calculs du PDSI intègrent également les variations climatiques entre les différents lieux et saisons (Wells et al., 2004).

Cependant, alors que les définitions et la manière de quantifier les sécheresses impliquent les notions de mesures relatives en comparaison à des normales, celles-ci évoluent au fil du temps. Ainsi, ce qui était autrefois considéré comme une sécheresse pourrait devenir la norme dans un climat de plus en plus sec (Hanel et al., 2018). La variabilité temporelle changeante doit donc être prise en compte dans sa définition selon Hanel et al. (2018).

Enfin, les sécheresses peuvent également être des catastrophes naturelles graves qui peuvent avoir des impacts économiques, sociaux et environnementaux significatifs lorsqu'elles sont de longue durée et qu'elles couvrent de vastes étendues spatiales (Van Loon et Van Lanen, 2012). Elles engendrent des déséquilibres entre la demande en eau et la capacité d'approvisionnement en eau du système naturel. Les impacts peuvent être exacerbés lorsqu'elles surviennent dans une région où les ressources en eau sont faibles ou lorsqu'elles ne sont pas correctement gérées (European Commission, 2023).

2.1.2 Causes de la sécheresse

Comme évoqué dans la définition, le manque de précipitations est la principale cause de sécheresse. Ce déficit est dû à une combinaison de facteurs, incluant le climat, la variabilité de la température de surface de la mer et les rétroactions entre la terre et l'atmosphère (Schubert et al., 2016). De plus, le manque de précipitation est influencé par des fluctuations météorologiques aléatoires et imprévisibles (Schubert et al., 2016). Il peut aussi être dû à des anomalies au niveau des températures tropicales de surface de la mer comme La Niña ou El Niño, comme ce fut le cas en Amérique du Nord ou dans l'est de la Chine (Dai, 2011).

D'autres facteurs liés à nos activités et nos besoins peuvent également favoriser la sécheresse. En effet, nos émissions de gaz à effets de serre et l'augmentation des températures liée à celles-ci augmentent la demande de la teneur en eau atmosphérique et modifient les schémas de circulation atmosphérique (Dai, 2011; Wang, 2005). La gestion des terres et de l'eau est également un facteur important à prendre en compte (Dai, 2011; Forzieri et al., 2014). En effet, selon la Commission européenne (2023), la surexploitation et la détérioration des ressources en eau exacerbent les conséquences des sécheresses en Europe. De plus, une mauvaise gestion des terres (terres cultivées en monoculture, sols nus, labours intensifs, etc) peut entraîner du ruissellement et de l'érosion, qui amplifient la sécheresse (Cook et al., 2009).

2.1.4 La sécheresse agricole

La sécheresse agricole (aussi appelée sécheresse édaphique) est un enjeu très important car elle affecte directement la croissance des plantes et les rendements des cultures agricoles (Ciais et al., 2005). Les pertes économiques dues aux sécheresses représenteraient, selon Ciais et al. (2005), 42 % de l'ensemble des pertes dues aux catastrophes naturelles. Elle résulte d'une faible teneur en eau dans la zone racinaire, ce qui amène la plante dans un état de stress hydrique. Cette faible teneur en eau est due à un déséquilibre entre l'infiltration et l'évapotranspiration causé par l'augmentation de la demande évaporative atmosphérique, par l'évaporation à partir du sol nu, par la transpiration par les plantes ou par le drainage vers les

eaux souterraines (Grillakis, 2019; Vicente-Serrano et al., 2014). Comprendre la dynamique de la teneur en eau du sol est donc d'une importance cruciale afin de prévoir et d'atténuer les impacts potentiels sur l'agriculture (Grillakis, 2019).

Pendant une période de sécheresse, le drainage et le ruissellement sont généralement faibles, mais l'évapotranspiration potentielle peut augmenter en raison d'une augmentation du rayonnement, de la vitesse du vent ou d'un déficit de pression de vapeur (par exemple, en raison d'une diminution de la teneur en eau disponible ou d'une augmentation de la température) (Grillakis, 2019). Cela peut entraîner une augmentation de l'évapotranspiration réelle, ce qui se traduit par une perte supplémentaire d'eau dans le sol et dans les plans d'eau ouverts. Par contre, en cas de sécheresse extrême, le manque de la teneur en eau disponible dans le sol et le flétrissement des plantes peuvent limiter l'évapotranspiration, limitant ainsi l'appauvrissement de la teneur en eau du sol, mais aussi les précipitations générées localement, ce qui contribue au maintien des conditions de sécheresse (Grillakis, 2019). La végétation est un facteur important dans la modification de ces rétroactions (Grillakis, 2019). Par ailleurs, des précipitations plus intenses mais moins fréquentes favorisent également les sécheresses agricoles, même si elles ne sont pas forcément liées à une sécheresse météorologique, car elles peuvent engendrer des quantités importantes de ruissellement, la capacité d'infiltration du sol étant vite atteinte (Dai, 2011).

2.1.3 Conséquences de la sécheresse agricole

Des réductions directes sur les rendements sont observées en tant que conséquences directes des sécheresses agricoles pour les cultures n'ayant plus suffisamment accès à l'eau (García-León et al., 2021). Entre 1964 et 2015, les sécheresses et les vagues de chaleur ont réduit les rendements céréaliers de l'UE de 9 % en moyenne et les rendements non céréaliers de 3,8 % (Brás et al., 2021). La canicule et la sécheresse de 2018 ont entraîné une baisse de la production céréalière globale de 8 % par rapport à la moyenne des 5 années précédentes (Brás et al., 2021). En 2003, la croissance de la végétation en Europe a été réduite de 30 % (Ciais et al., 2005). Crocetti et al. (2020) ont évalué l'impact des sécheresses dans le bassin pannonien (Europe centrale et de l'est). Selon eux, les sécheresses ont entraîné une perte de rendement de plus de 40 % pour le maïs et entre 25 et 37,5 % pour le blé d'hiver par rapport aux rendements moyens de 2000-2015 en Hongrie, Roumanie, Slovaquie et en Serbie. Les sécheresses pourraient réduire la production économique agricole méditerranéenne de plus de 10 % pour des niveaux élevés de réchauffement climatique selon Naumann et al. (2021).

Ces pertes de rendement ont des impacts sur les prix. Les estimations des pertes annuelles actuelles dues à la sécheresse en Europe varient considérablement et sont généralement difficiles à mesurer de par la difficulté d'obtenir des données précises sur les pertes (Naumann et al., 2021). En Europe, les dommages liés aux sécheresses ont été estimés à plus de 100 milliards d'euros pour la période 1976-2006 par Ionita et Nagavciuc (2021). Naumann et al. (2021) fournissent une estimation comprise entre 3,4 et 26,6 milliards d'euros par an.

La sécheresse de 2003 aurait engendrée des pertes économiques évaluées à 8,7 milliards d'euros selon l'European Environment Agency (2010) et à 17,1 milliards d'euros selon le CRED (Center for Research on the Epidemiology of Disaster) et l'UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2018). Dans les régions les plus vulnérables, les conséquences sont principalement sociales avec des famines et des pertes de vies humaines (Van Loon et Van Lanen, 2012).

Les épisodes les plus extrêmes engendrent des hausses des prix importantes sur le marché. Les prix du blé tendre et de l'orge ont augmenté de 34% et 48%, respectivement, lors de la sécheresse de 2018 (Brás et al. 2021). La façon dont les sécheresses sont gérées influence directement leurs coûts. En 2015, les dommages économiques étaient moindres qu'en 2003, grâce à une meilleure gestion au niveau national et européen selon Ionita et Nagavciuc (2021).

Les sécheresses ont également des coûts sur d'autres secteurs comme la production d'énergie, l'approvisionnement en eau, la navigation fluviale et les dommages aux bâtiments (figure 2). Les conséquences sur les écosystèmes et les effets économiques indirects ne sont généralement pas monétisées étant donnée la difficulté à les quantifier (Naumann et al., 2021). Dans le futur, les sécheresses devraient induire des coûts plus élevés et la part des coûts liés aux différents secteurs devraient être modifiées (figure 2). Les pertes absolues globales dues à la sécheresse en Europe, en 2100, s'élèveraient à 25 milliards d'euros par an pour une augmentation de la température de 1,5°C, et à 31 milliards d'euros par an pour une augmentation de température de 2°C, soit une augmentation de 170 % et de 250 % par rapport aux dommages de référence (Naumann et al., 2021)

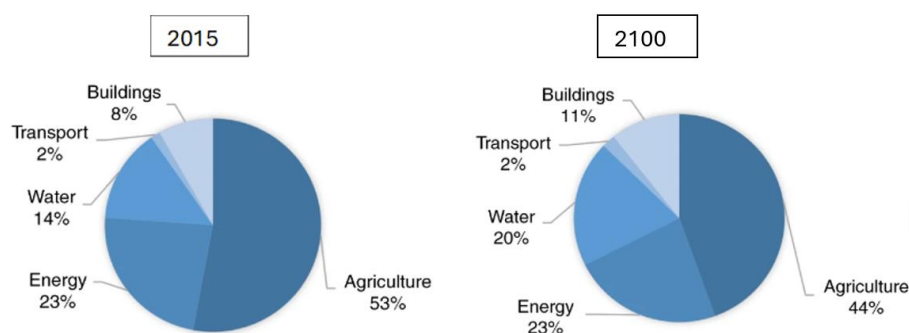


Figure 2 : part des coûts dues aux sécheresses liées aux différents secteurs en Europe en 2015 (à gauche) et pour une projection en 2100 (à droite) (Naumann et al. 2021)

2.2 La sécheresse en Europe

2.2.1 Historique

Afin d'analyser la situation actuelle des sécheresses en Europe et leurs impacts, il est intéressant de voir comment celles-ci ont évolué du début du XX^{ème} siècle jusqu'à nos jours. A cette fin, Ionita et Nagavciuc (2021) ont analysé l'évolution de ces sécheresses sous trois aspects : la superficie concernée, la fréquence décennale et l'intensité. Ils ont analysé ces aspects selon les trois indices mentionnés au point 2.1.1 : l'indice standardisé des précipitations, l'indice standardisé d'évapotranspiration-précipitations et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer. Ces 3 indices seront appelés respectivement SPI12, SPEI12 et scPDSI dans la suite. Tous les indices sont calculés sur base de données de précipitations mensuelles, de température moyenne mensuelle de l'air et d'évapotranspiration potentielle. Ionita et Nagavciuc (2021) ont analysé ces trois indices au cours de la période 1901-2019 en découpant l'Europe en trois zones : a) la région Europe du Sud/Méditerranée (MED), b) l'Europe centrale (CEU), et c) l'Europe du Nord (NEU) (figure 2).

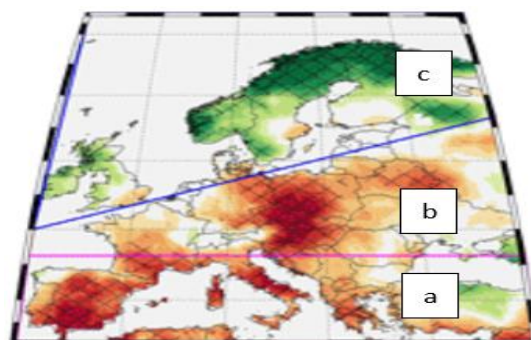


Figure 3 : Les régions d'Europe selon Ionita et Nagavciuc (2021).

Au niveau des zones, la région MED a connu une augmentation significative des zones affectées pour tous les indices (figure 4) depuis les années 80 pour le SPEI12. Ces valeurs étaient relativement constantes depuis 1900 (excepté pour la tranche 1940-1950). Les années pour lesquelles les superficies affectées par tous les types de sécheresse ont été les plus importantes relèvent toutes de la dernière décennie. Dans l'ensemble, l'étendue de la zone de sécheresse est sous-estimée par le SPI12 par rapport au SPEI12 et au scPDSI au cours des 30 dernières années, car le SPI12 prend en compte uniquement la variabilité des précipitations et néglige la température qui a pourtant un rôle essentiel sur la sécheresse en jouant sur l'évaporation des sols (Ionita et Nagavciuc, 2021).

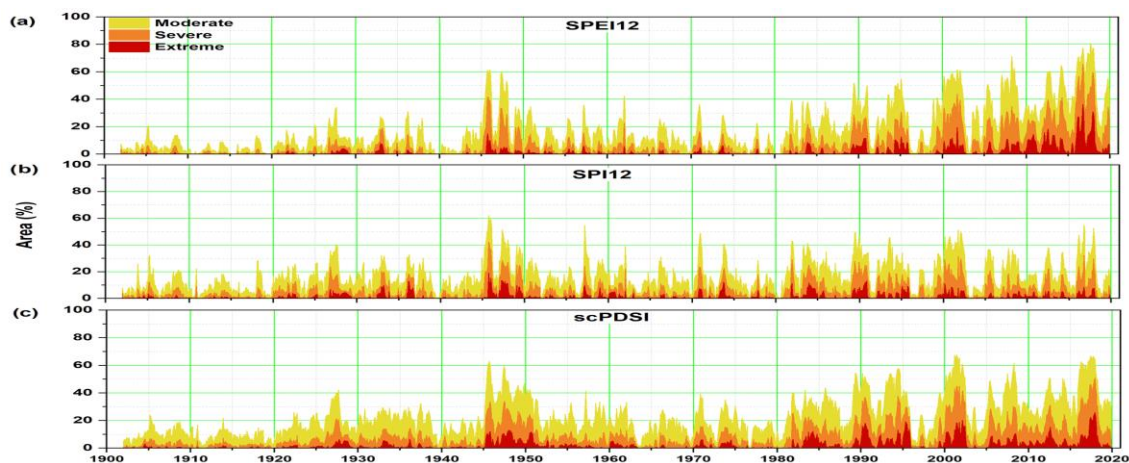


Figure 4 : Évolution temporelle du pourcentage de la superficie touchée par les sécheresses en région Méditerranéenne selon les indices de sécheresse (a) SPEI12, (b) SPI12 et (c) scPDSI (Ionita et Nagavciuc, 2021)

En Europe centrale, on observe des périodes alternant entre sécheresses intenses et années ordinaires ou humides. Parfois, jusqu'à 90 % de la région peut être affectée par des sécheresses prolongées, tandis qu'à d'autres moments, la sécheresse est absente ou couvre une zone beaucoup plus restreinte (figure 5). Il y a cependant une tendance croissante pour le SPEI12 pour les 20 dernières années.

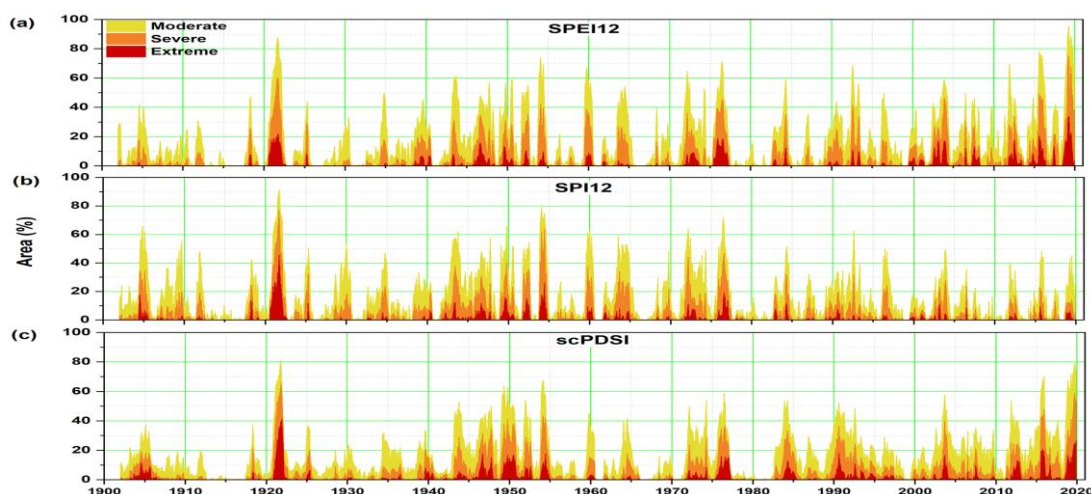


Figure 5 : Évolution temporelle du pourcentage de la superficie touchée par les sécheresses en Europe centrale selon les indices de sécheresse (a) SPEI12, (b) SPI12 et (c) scPDSI (Ionita et Nagavciuc, 2021)

La couverture spatiale des sécheresses pour l'Europe du nord montre une tendance différente des tendances en Europe centrale et méditerranéenne MED pour les dernières décennies. En effet, la couverture spatiale et la fréquence sont relativement faibles depuis les années 1980 pour tous les indices analysés par rapport à ceux de la première partie du 20ème siècle (figure 6).

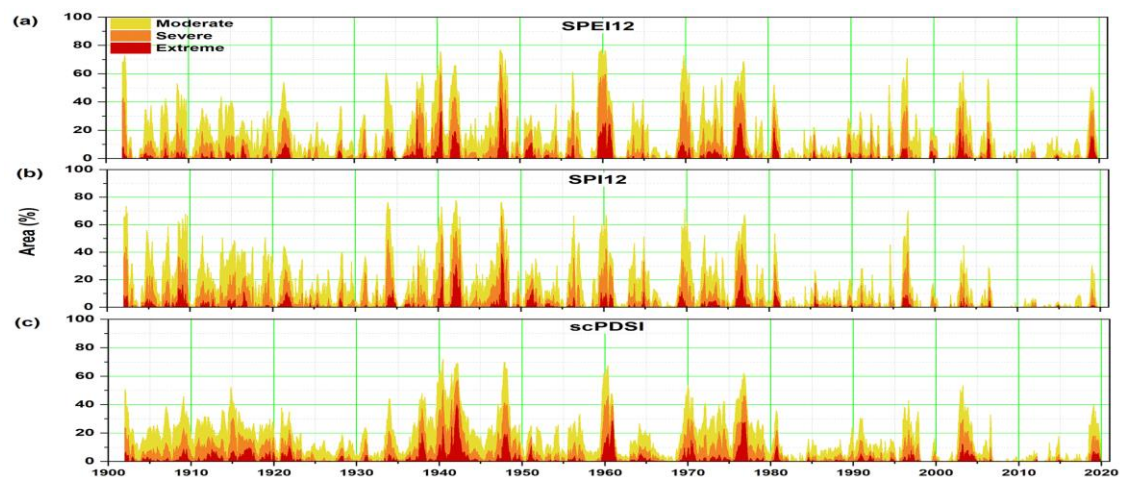


Figure 6 : Évolution temporelle du pourcentage de la superficie touchée par les sécheresses en Europe du Nord selon les indices de sécheresse (a) SPEI12, (b) SPI12 et (c) scPDSI (Ionita et Nagavciuc, 2021)

Au niveau de la fréquence décennale, qui est exprimée comme le nombre de mois touchés par la sécheresse par période de 10 ans, l'Europe a été caractérisée par une distribution spatiale variant dans le temps pour les sécheresses dites « modérées » (en jaune dans les figures 4, 5 et 6) (Figure 7). Au cours des quatre dernières décennies, il y a cependant une nette réduction de la fréquence des événements secs dans les régions du nord à l'inverse de celles du centre et du sud. La décennie la plus sèche est celle de 1941-1950.

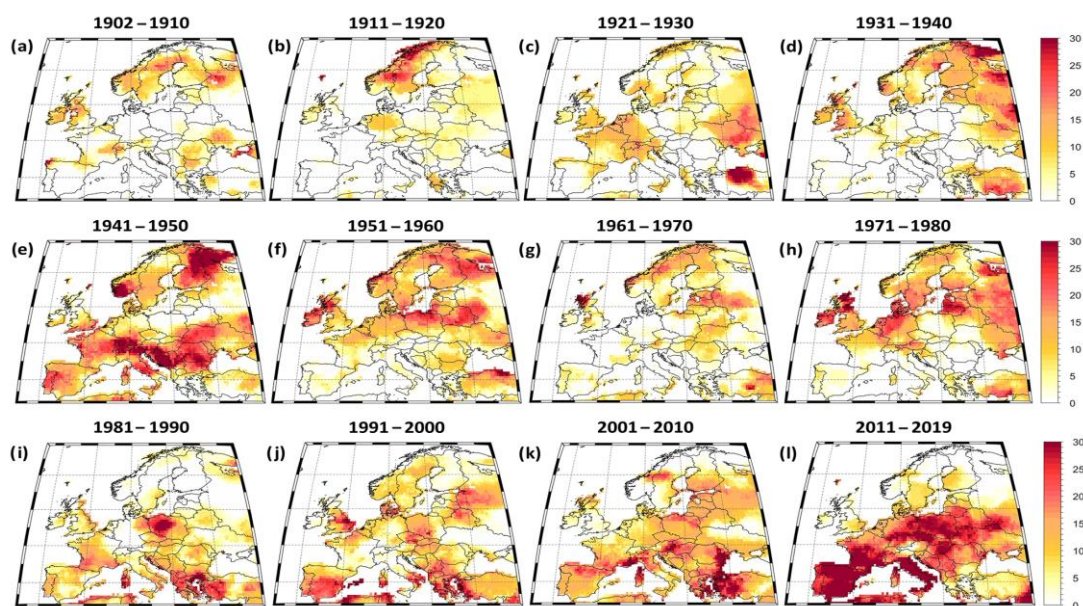


Figure 7 : Fréquence décennale de la durée des sécheresses modérées, avec un seuil comme étant le 25^e percentile pour les précipitations et les températures de l'air moyennes (Ionita et Nagavciuc, 2021)

En conclusion, les événements de sécheresses ne sont pas exceptionnels en Europe depuis 1900. En revanche, il y a une tendance à la hausse des sécheresses au niveau de la superficie concernée et de la fréquence pour les 30 dernières années dans le sud de l'Europe et, à un degré moindre, dans l'Europe centrale.

2.2.2 Tendances actuelles et prévisions

Depuis le début du XXI^e siècle, l'Europe a connu des vagues de chaleur records et une série d'étés extrêmement chauds et secs (2003, 2010, 2013, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2022) (Buras et al., 2020; Fink et al., 2004; García-Herrera et al., 2019; Ionita et al., 2017; Tripathy et Mishra, 2023). Ces étés chauds combinés à un manque de précipitations conduisent à des sécheresses dites exceptionnellement graves et affectent un large éventail de secteurs socio-économiques (Hanel et al., 2018). De plus, de récentes périodes non estivales ont également été marquées par des événements de sécheresse extrêmes comme en automne 2006 ou en hiver 2007 (Luterbacher et al., 2007). Une tendance à l'assèchement est observée au niveau de la teneur en eau du sol dans les régions centrales et du sud de l'Europe depuis le début du 21^e siècle (Ionita et Nagavciuc, 2021; Seneviratne et al., 2012).

La tendance à la hausse des sécheresses (météorologiques et agricoles) devrait se poursuivre et s'accroître jusqu'à la fin du XXI^e siècle dans le sud et l'ouest de l'Europe (Spinoni et al., 2018 ; Vicente-Serrano et al., 2021). Ces sécheresses devraient devenir plus fréquentes, plus intenses et durer plus longtemps avec les changements climatiques (Ault, 2020; European Commission, 2020; Forzieri et al., 2014; Naumann et al., 2021). Les sécheresses hydrologiques deviendront également plus fréquentes et intenses dans les régions méditerranéennes et de l'Europe de l'Ouest, principalement en été, en raison de l'augmentation de l'évaporation et de la diminution des précipitations (Berg et al., 2016; Naumann et al., 2021).

2.3 La sécheresse en Belgique

Il y a également une tendance à la hausse des sécheresses en Belgique depuis les années 2000. La sécheresse de 2003, qui a entraîné des pertes agricoles estimées à 130 millions d'euros, la succession des années 2017-2018-2019 ainsi que la sécheresse de 2022 (Thibaut et Ozer, 2021; Tripathy et Mishra, 2023) illustrent en partie cette tendance. Sur les vingt dernières années, sept d'entre-elles (2006, 2011, 2015, 2016, 2017, 2018 et 2022) ont été touchées par une sécheresse reconnue comme calamité naturelle (Lambert et al., 2020). Une sécheresse est reconnue comme calamité agricole quand celle-ci atteint un montant total de dégâts agricole supérieur à 1,5 million d'euros (SPW, 2022). Une cellule « sécheresse » a été créée en juin 2017 pour gérer les épisodes de sécheresse. Elle se réunit encore régulièrement afin d'assurer un suivi de la situation des ressources en eau. La cellule est composée de plusieurs administrations de la Région wallonne, de producteurs et distributeurs d'eau, de représentants du secteur de l'énergie et de certaines communes régulièrement touchées par des restrictions d'eau (SPW, 2024). Par ailleurs, Naumann et al. (2021) prévoient une augmentation significative des dommages liés à la sécheresse en Belgique dans les années à venir.

Les ressources wallonnes en eaux souterraines sont conservées au sein de sept formations aquifères principales couvrant l'ensemble du territoire wallon. Les formations calcaires et crayeuses présentes dans le nord de la Wallonie sont constituées de nappes de grandes capacités dans lesquelles plus de 75 % du volume total annuel des prélèvements d'eau souterraine est réalisé. A l'opposé, les aquifères du socle cambro-silurien et des massifs schisto-gréseux du Dévonien occupent la majeure partie de la Wallonie mais fournissent seulement 6,8% des volumes prélevés en raison d'une faible capacité de stockage (Thibaut et Catas, 2020). Ce déséquilibre signifie que certaines zones de Wallonie moins bien desservies sont dépendantes d'autres zones qui doivent suppléer à leurs besoins.

Il pourrait donc avoir un risque de pénurie en cas de surexploitation ou de mauvaise recharge hivernale (Thibaut et Catas, 2020). Au vu de la forte densité de population, des prélèvements d'eau annuels non négligeables, des récents déficits pluviométriques et des probables futures sécheresses, la gestion de l'eau est un enjeu majeur en Belgique (SPW, 2020 ; Thibaut et Catas, 2020). La Belgique est d'ailleurs classé 23ème parmi les pays à risque de pénurie d'eau par le rapport « World Resources Institute » (Kuzma et al., 2023). La Flandre est plus à risque que la Wallonie. Le risque de pénurie d'eau se traduit par une utilisation excessive de l'eau, par l'agriculture irriguée, les industries ou les municipalités, par rapport à sa capacité de renouvellement annuelle. Pour atténuer ces risques, il est crucial de conserver l'eau de pluie en la laissant s'infiltrer dans le sol, en renforçant les réserves d'eau souterraine, en limitant les constructions, en installant des puits d'eau et en réduisant le drainage agricole (Willems, 2023).

2.4 Le water harvesting

2.4.1 Principes

Un des moyens pour lutter contre la sécheresse est le water harvesting. Le water harvesting regroupe les pratiques de récupération et de gestion des eaux de précipitations et de ruissellement avec pour but d'augmenter la disponibilité de l'eau pour les usages domestiques, agricoles et la durabilité des écosystèmes (WOCAT, 2012). Il permet aux agriculteurs de stocker l'eau lorsqu'elle est abondante et de la rendre disponible lorsqu'elle est rare (FAO, 2024a). L'eau ainsi recueillie peut être utilisée pour l'irrigation, ou être stockée en surface ou dans des réservoirs souterrains, tels que des citernes ou des réservoirs peu profonds en vue d'une utilisation ultérieure (Hillel, 2005).

Selon le WOCAT (World Overview of Conservation Approaches and Technologies), les systèmes de collecte des eaux de ruissellement peuvent être séparés en 2 classes selon que l'eau est utilisée directement là où elle est captée (in situ) ou non (ex situ). Les systèmes de collecte des eaux de pluie in situ sont basés sur une modification des techniques de gestion des sols et de l'eau, dans le but d'améliorer l'apport d'eau à la surface du sol en améliorant l'infiltration, la capacité de rétention de l'eau et la fertilité du sol. Ces systèmes luttent également contre l'érosion du sol. Pour se faire, l'eau de pluie qui ruisselle dans les champs en pente est captée dans le champ et stockée dans le sol pour une utilisation immédiate par les cultures (WOCAT, 2012). Dans les systèmes ex situ, l'eau n'est pas utilisée dans la même zone que le support de stockage. L'eau est stockée dans des réservoirs naturels ou artificiels de différentes dimensions (des puits, des étangs, des citernes, ...) à des fins d'irrigation ou d'usage domestique. La surface de captage a une capacité d'infiltration faible ou nulle. Une méthode courante consiste à collecter l'eau de pluie dans des bassins à petite échelle ou sur les toits. La collecte ex situ des eaux de pluie peut réduire la pression exercée sur les eaux de surface et les eaux souterraines environnantes (WOCAT, 2012). Selon l'ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas), le water harvesting est divisé selon la taille du bassin versant ; on retrouve donc les méthodes de micro-captages et celles de macro-captages (Figure 8). Les méthodes de micro-captages désignent des systèmes où les eaux de ruissellement sont collectées à petite échelle, où l'eau est soit stockée dans la zone racinaire pour une utilisation directe par les plantes, soit stockée dans un petit réservoir en vue de répondre aux demandes d'eau futures (WOCAT, 2012). Cette catégorie s'applique directement en champs ou sur des surfaces de captage non terrestres (les toits des bâtiments, les structures imperméables, etc). Les méthodes de macro-captage sont caractérisés par le fait que l'eau de ruissellement est collectée à partir d'un bassin versant relativement grand et est souvent un parcours naturel, une steppe ou une zone montagneuse. Les bassins versants

de ces systèmes sont le plus souvent situés en dehors des limites de l'exploitation, où les agriculteurs ont peu ou pas de contrôle (Oweis et al., 2001).

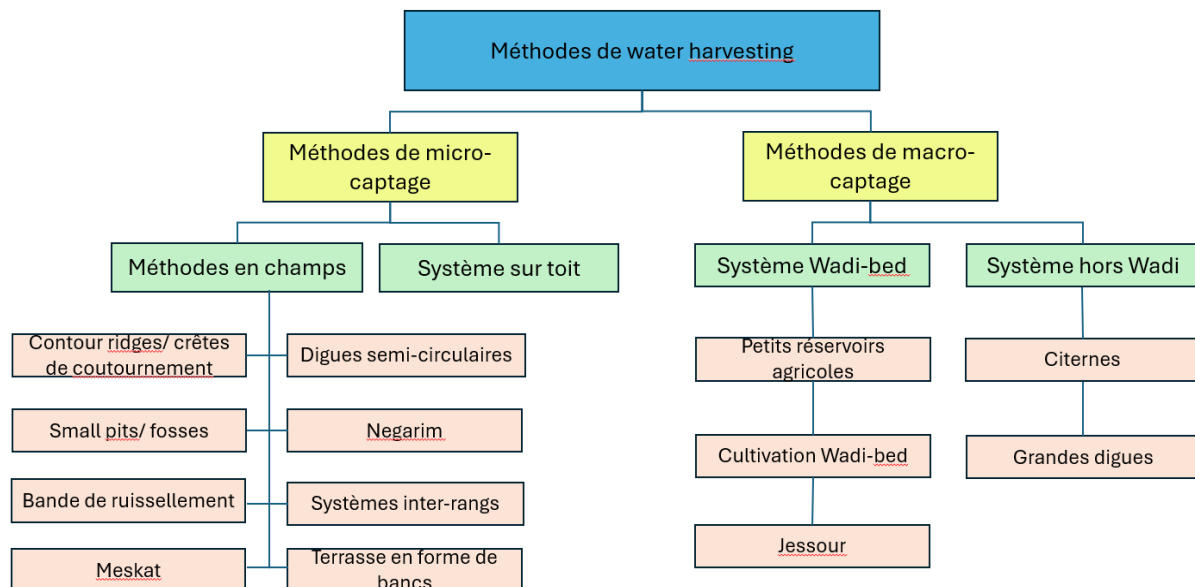


Figure 8 : Classification des méthodes de water harvesting selon l'ICARDA (Safriel et Sliman 2007)

La collecte des eaux de ruissellement étant une tradition ancienne utilisée depuis des millénaires dans la plupart des zones arides (Hillel, 2005), de nombreuses techniques ont été développées. Certaines techniques similaires portent parfois des noms différents selon les régions et d'autres ont des noms similaires mais sont complètement différentes dans la pratique. (Oweis et al., 2001)

2.4.2 Méthodes de micro-captage in situ par modification du microrelief

Les méthodes de micro-captage in situ font références aux systèmes de collecte d'eau de ruissellement qui captent l'eau sur un petit bassin versant où l'eau est utilisée directement sur l'endroit où elle est collectée. Ces techniques réduisent considérablement le ruissellement de l'eau d'une zone en utilisant des structures qui retiennent l'eau et qui favorisent ainsi l'infiltration, ce qui améliore le stockage en eau du sol (FAO, 2024a). Elles peuvent augmenter significativement le rendement des cultures, notamment en céréales (Bouma et al., 2016).

Ces techniques sont principalement utilisées dans les régions semi-arides (Antoine et al., 2012). Elles sont généralement appliquées sur des sols en pente et jouent sur le stockage de surface du sol (Antoine et al., 2012). Ce stockage inclut deux concepts ; le depression storage (la capacité de rétention des dépressions) et le surface detention (la détention superficielle). La capacité de rétention des dépressions représente la quantité d'eau stockée dans les creux et dépressions du sol. La détention superficielle correspond à la lame d'eau excédentaire au-delà du depression storage causée par le ruissellement, elle varie selon les pratiques de travail du sol, de la rugosité du sol et des conditions climatiques (Martin et al., 1997).

Globalement, les méthodes de micro-captage appliqués en champs sont simples et peuvent être construits à faible coût, ce qui les rend facilement reproductibles et adaptables. Ils permettent de contrôler l'érosion du sol en réduisant le ruissellement. Elles peuvent être adaptées pour toutes les pentes et toutes les cultures (Oweis et al., 2001). Voici une liste non exhaustive des principales méthodes de micro-captage in situ.

A. Zai (ou small pits)

La technique du zaï consiste en l'implantation de petites fosses d'un diamètre de 0,3 à 2 m et d'une profondeur de 5 à 15 cm sur des terres en pente (figure 9). Ces fosses sont généralement utilisées en combinaison avec des digues pour conserver le ruissellement, qui est ralenti par les digues (Oweis et al., 2001). Les systèmes de zaï sont principalement utilisés pour les cultures annuelles, en particulier les céréales telles que le millet, le maïs et le sorgho (Pradhan et Sahoo 2019). Elles sont parfois considérées comme une technique de conservation de l'humidité in situ plus que comme une technique de collecte de l'eau (Oweis et al., 2001).

D'après l'étude de Gnoumou et al. (2017), le zaï permet une augmentation de 50% de la production de rendement grains du sorgho (au Burkina Faso) par rapport à une culture sans zaï. Le développement du sorgho est également plus rapide. De plus, les traitements incluant le zaï ont accumulé une quantité de matière organique importante et maintiennent par ailleurs le pH du sol. L'étude de Clavel et al. (2009) a par ailleurs démontré que la technique du zaï (mécanique) permet un accroissement des revenus du producteur de l'ordre de 229 €

par hectare. Cette étude souligne le fait que le gain de rendement dû à cette technique est d'autant plus grand que les pluies sont irrégulières, ce qui constitue un facteur important pour la sécurité de la production du paysan.



Figure 9 : Création de zaï au Burkina Fasso (IUCN, 2017)

A. Les digues semi-circulaires et trapézoïdales ou demi-lunes (semi-circular et trapezoid bunds ou half moons)

Il s'agit généralement de digues en terre qui ont la forme d'un demi-cercle, d'un croissant ou d'un trapèze orientées directement vers le haut de la pente (Oweis et al., 2001). Elles sont créées avec un espacement qui permet un captage de l'eau de ruissellement qui s'accumule devant l'endroit où sont cultivées les plantes (figure 10). L'introduction de Negarim dans les terres dégradés permet de favoriser significativement la repousse des espèces végétales natives. Ces structures de conservation de l'humidité du sol augmentent également la diversité, la richesse et la population des espèces végétales indigènes (Kelil et al., 2023).

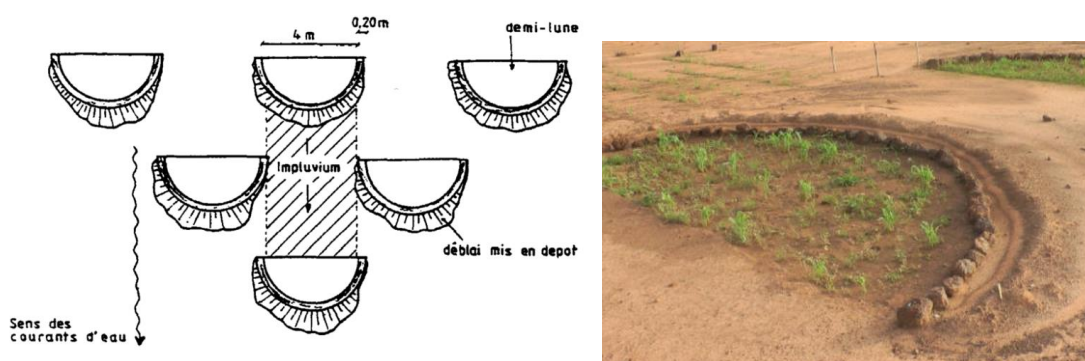


Figure 10 : Digues semi-circulaires. A gauche : schéma représentant les digues semi-circulaire (Greener Land, 2024). A droite : digue semi-circulaire en place dans le bassin Tanin (Sambalino et Steenberg 2012)

B. Contour bunds

Les contour bunds sont des structures de conservation de l'eau composées de buttes en terre construites perpendiculairement à la pente d'un terrain (figure 11) suivant les courbes de niveau (Critchley et al., 2013). L'espacement entre les buttes est faible, généralement de 1 à 2 mètres de large (Critchley et al. 2013). Elles sont conçues pour stocker les eaux de ruissellement et prévenir l'érosion en ralentissant et en redistribuant l'eau de pluie sur le sol (FAO, 2024a). Elles sont généralement utilisées dans les environnements plus secs où la production est risquée et où les rendements sont faibles (Oweis et al., 2001).

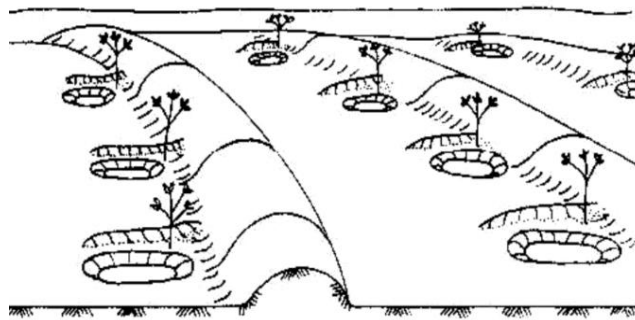


Figure 11 : Schéma de contour bunds (Critchley et al., 2013)

C. Negarim

Les Negarims sont des petites structures en forme de losange entourées de digues de terre (figure 12), elles sont largement utilisées pour la culture d'arbre en régions semi-arides (Obala et al., 2022). Ces petits bassins de ruissellement sont orientés de manière à ce que la pente maximale du terrain soit parallèle à la longue diagonale de sorte que les eaux de ruissellement s'écoulent vers le coin le plus bas, où la plante est placée (Oweis et al., 2001). Les dimensions sont de 5 à 10 m de largeur et de 10 à 25 m de long (Pradhan et Sahoo, 2019).



Figure 12 : Negarim (Pradhan et Sahoo, 2019)

E. Tie-ridging/ furrow diking/ cloisonnement des interbuttes

La technique du tie-ridging (pour buttes cloisonnées) consiste en un système de micro-bassins dans les sillons séparés par des diguettes (figure 13). Ces diguettes mesurent de 15 à 20 centimètres de haut et permettent à l'eau de rester dans les micro-bassins formés en cas de précipitations, ce qui donne plus de temps à l'infiltration de l'eau dans le sol (Anschütz et al., 2003). Dans les zones semi-arides, le tie-ridging peut s'avérer très efficace pour stocker l'eau de pluie, en particulier pendant les saisons les plus sèches. Cette technique permet d'augmenter considérablement les rendements de cultures majeures en terres sèches, telles que le maïs, le sorgho, le blé et le haricot mungo. Le tie-ridging peut également être implémenté directement sur le sommet du buttage en fonction du modèle de plantation (Rwehumbiza et al., 2000; Tolossa et al., 2020).

Cette technique est également souvent utilisée aux Etats-unis où elle porte le nom de furrow diking (pour endiguement des sillons). Elle est principalement utilisée en cultures de céréales et en cultures de coton. Le furrow diking donne de bons résultats en terme de mitigation du ruissellement (Gerard et al., 1984). Il peut également permettre d'augmenter le rendement comme ce fut le cas dans l'étude de Gerard et al. (1984), qui ont constaté une augmentation de rendement de 31% entre une culture de coton dans un champ où la technique du furrow diking a été mise en place et un champ témoin.



Figure 13 : Technique du tie-ridging. A gauche, schéma explicatif du tie-ridging utilisé en région semi-aride (Anschütz et al., 2003). A droite, image représentant le furrow diking après un évènement pluvieux dans les grandes plaines Américaine (USDA, 2009)

Dans nos régions, cette technique est mise en place en culture de pomme de terre et porte dans ce cas le nom de cloisonnement des interbuttes. Ici, les billons principaux sont déjà présents et les diguettes sont intégrées directement entre les buttes de pommes de terres créant, comme son nom l'indique, une sorte de cloisonnement (figure 14). Cette technique est très efficace dans la réduction du ruissellement et est bénéfique pour l'infiltration de l'eau dans le sol (Olivier et al., 2014).



Figure 14 : Cloisonnement des interbuttes en pommes de terre. A gauche, photo des micro-bassins après un évènement pluvieux, à droite photo des micro-bassins au moment du semé (SPW, 2020)

Le projet LIFE SWAP-CPP mené sur la saison 2016-2017 a permis de conclure que la Barbutte (figure 15) permet de réduire le ruissellement de 97% (Protect'EAU, 2018). Un autre projet mené par le centre de recherche agronomique wallon (CRA-W) en 2011 à Huldenberg a déterminé que le cloisonnement des interbuttes permettait de réduire en moyenne le ruissellement de 70%. Le rendement en pommes de terre a augmenté, passant de 37,6 tonnes/ha pour les parcelles témoins à 40,5 tonnes/ha pour les parcelles cloisonnées.

Le cloisonnement des interbuttes permet une meilleure rétention en eau du sol, l'étude de Olivier et al. (2014) démontre une augmentation considérable de la teneur en eau et du stockage de l'eau dans le sol grâce au cloisonnement. D'autres outils agricoles sont utilisés en Europe, tels que le Dyker de Grimme en Allemagne (figure 15) ou la cloisonneuse de DEMACConstruct en Belgique, pour mettre en place cette technique. En Wallonie, cette technique est principalement utilisée dans les régions vallonnées où les champs de pommes de terre sont très sensibles à l'érosion et au ruissellement, car les sillons sont orientés dans le sens de la pente pour permettre la récolte (Olivier et al. 2014).



Figure 15: A gauche, photo de la French Barbutte Cottard (Olivier et al., 2014). A droite, photo du Dyker de Grimme (Protect'EAU, 2018).

2.5 Le rouleau anti-érosif en culture de maïs en Wallonie

Le maïs occupe une place importante dans l'agriculture wallonne. La culture du maïs fourrager et du maïs grain avoisine les 60.000 hectares en 2018, soit 8 % de la surface de terre disponible pour la production agricole (CIPF, 2024b). Le maïs fourrager est majoritairement cultivé par rapport au maïs grain avec en moyenne 93% du total des surfaces de maïs cultivées (entre 2007 et 2010) (Delcour et al., 2014). Le maïs est une culture problématique d'un point de vue érosif. D'une part, elle a faible recouvrement du sol dû à l'écartement important entre ses rangs et d'autre part, elle est semée relativement tardivement dans la saison à cause de sa sensibilité au froid (CIPF, 2024b). De plus, la période qui précède la fermeture des lignes de maïs, de fin avril à début juillet, coïncide souvent avec une saison propice aux orages, ce qui favorise le risque d'érosion (CIPF, 2024b). En 2021, environ 40 % de la superficie cultivée en maïs d'ensilage était située sur des pentes supérieures à 5 %, et 8 % de la superficie cultivée présentait des pentes supérieures à 10 % (Clément et al., 2023).

Afin de réduire le ruissellement et de lutter contre l'érosion, le CIPF a créé un « rouleau anti-érosif » qui implémente des dépressions peu profondes (environ 6 cm de profondeur, 25 cm de longueur et 40 cm de largeur) dans l'interligne des cultures de maïs (figure 16) (Clément et al., 2023).



Figure 16 : Micro-dépressions créées par le combiné Eruistop. A gauche au moment du semis, à droite après un évènement pluvieux (CIPF, 2024b)

Ces dépressions sont créées par le rouleau qui vient gratter le sol et servent à éviter le ruissellement, en améliorant le stockage à la surface du sol. Elles augmentent le temps lié à l'infiltration de l'eau dans le sol (CIPF, 2024b). Ce rouleau fait partie d'un outil agricole nommé le combiné de semis Eruistop et est composé d'un semoir de précision, d'une rotative et d'un rouleau antiérosif (figure 17).

Il suffit d'un seul passage sur la parcelle pour effectuer la préparation du sol et le semis. De cette manière, les dépressions ne risquent pas d'être dégradées par d'éventuels passages supplémentaires. Même s'il y ressemble, le travail du sol effectué par le rouleau antiérosif du CIPF ne peut être considéré comme du tie-ridging, dans le sens où des crêtes ne sont pas réellement créées (Bélis, 2018).



Figure 17 : A gauche, le combiné EruiStop, composé d'un semoir de précision, d'une rotative et d'un rouleau antiérosif. A droite, le rouleau anti-érosif créant les dépressions. (CIPF, 2023)

D'après l'étude de Clément et al. (2023), la capacité de rétention des micro-dépressions n'a pas de forte tendance à diminuer au fil du temps qui pourrait être dû à un potentiel remplissage par les sédiments ou des ruptures lors d'événements pluvieux érosifs. En effet, dans cette étude, ni le temps cumulé, ni les précipitations cumulées, ni l'énergie cinétique des précipitations cumulées depuis l'implémentation des micro-dépressions ne montrent un effet statistiquement significatif sur le ruissellement ou l'érosion. Les indicateurs d'événements pluvieux tels que les précipitations totales ou l'intensité horaire maximale et moyenne ne montrent pas non plus d'effet statistiquement significatif sur le ruissellement ou l'érosion. Dans cette étude, l'effet sur la teneur en eau du sol et le rendement du maïs n'ont pas été étudiés.

3. Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer le potentiel des micro-dépressions, créées par le rouleau anti-érosif, à limiter la perte de rendement du maïs fourrager durant les années sèches en Wallonie. Deux sous-objectifs distincts sont approfondis afin de répondre à cet objectif. Le logiciel de simulation de croissance de culture Aquacrop est utilisé et différents scénarios y sont investigués.

Le premier sous-objectif cherche à comparer le rendement en maïs fourrager entre des parcelles contenant des micro-dépressions et des parcelles témoins, pour un sol de la région limoneuse. A cet effet, les conditions météorologiques des années les plus sèches en Wallonie depuis 1999 sont simulés. Ces simulations incluent, pour chaque année considérée, des sols de différentes épaisseurs et pentes afin de vérifier de potentiels effets liés à ces variables. Ce sous-objectif vise à évaluer l'utilité potentielle que le rouleau anti-érosif aurait pu avoir en Wallonie lors d'années sèches récentes, en se limitant à un sol limoneux à capacité d'infiltration spécifique.

Le second sous-objectif vise à définir dans quelles situations le rouleau anti-érosif est le plus intéressant en termes d'augmentation du rendement. Ce sous-objectif implique une analyse de la variation du rendement en fonction de la quantité supplémentaire d'eau infiltrée grâce au rouleau, pour des années aux pluviométries variées. L'analyse inclue des sols de différentes épaisseurs et charges caillouteuses, pour chacune de ces années. Ce sous-objectif analyse l'effet du rouleau pour une large gamme de sols présentant différentes capacités d'infiltration.

4. Matériels et méthodes

Cette section présente d'abord le modèle de simulation utilisé ainsi que les différents paramètres renseignés qui servent à représenter au mieux les conditions des sols Wallons. Ensuite, une seconde partie explique comment les micro-dépressions sont implémentés dans Aquacrop, un point sur l'effet de ces micro-dépressions en fonction de la pente y est approfondi. Enfin, une troisième partie parle des différents scénarios qui ont été simulés.

4.1 Aquacrop

4.1.1 Présentation du modèle

AquaCrop est un modèle de simulation, développé par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), qui permet de prévoir la productivité des cultures en fonction de la disponibilité en eau. Il est particulièrement utile pour optimiser l'utilisation de l'eau en agriculture, évaluer les impacts du changement climatique sur la production agricole et améliorer la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau. Il est utilisé par les agriculteurs, qui souhaitent simuler des rendements pour différents scénarios, mais également dans le cadre de projets de recherche. C'est le modèle de simulation de référence par rapport aux rendements simulés en fonction de la disponibilité de l'eau ; c'est en partie ce qui justifie le choix de ce modèle.

AquaCrop prend en compte plusieurs paramètres clés tel que le climat, le sol, la culture et la gestion de l'eau qui comprend l'irrigation, les pratiques de conservation de l'eau et la gestion des cultures. Afin de comprendre un peu plus en profondeur le fonctionnement d'Aquacrop, il convient d'approfondir comment celui-ci calcule le bilan hydrique du sol. Ce bilan est basé sur la pluviométrie, le stockage dans la couche supérieure du sol, l'évapotranspiration ainsi que les pertes par ruissellement et par percolation profonde.

Pour estimer la fraction de l'eau de pluie qui ruisselle par rapport à la pluviométrie, Aquacrop utilise la méthode du curve number (CN) de l'USDA (United States Department of Agriculture). Ce point sera approfondi dans le point 4.2.1. Durant la simulation, Aquacrop ajuste le CN quotidiennement en fonction de l'humidité antécédente du sol afin de prendre en compte les variations journalières des conditions météorologiques et des conditions du sol. D'autre part, il ajuste le CN en prenant en compte la croissance de la végétation. Pour ce faire, Aquacrop calcule la capacité supplémentaire d'infiltration du sol dû à la mobilisation de l'eau par les racines à mesure que la couverture végétale augmente (FAO, 2024b).

Une fois la portion d'eau infiltrée déterminée, AquaCrop simule le mouvement de l'eau à travers les différents horizons du sol en fonction de la capacité de rétention d'eau du sol, de la profondeur racinaire des cultures, de l'évapotranspiration et des besoins en eau des cultures. Un potentiel stress hydrique est évalué et l'impact sur la croissance et le rendement des cultures en est déduit. Si la capacité de stockage de la zone racinaire est dépassée, l'excès d'eau est perdu par percolation profonde (FAO, 2024b).

4.1.2 Paramètres du modèle

Cette section présente les différents paramètres utilisés pour représenter au mieux la culture du maïs en Wallonie pour les années récentes.

A) Le climat

Les données météorologiques ont été obtenues auprès d'Agromet¹ pour la station de Louvain-La-Neuve entre le 1 janvier 1999 et le 31 décembre 2023 par pas de temps journalier. Après avoir choisi les années simulées, sur base de leur pluviométrie (voir point 4.3), les données météorologiques de ces années ont été incorporées dans Aquacrop sous forme de « fichier climat ». Les paramètres obtenus par Agromet sont les suivants :

- 1) ensoleillement total de la journée² [J/cm^2]
- 2) évapotranspiration de référence³ (ET_o) [mm/jour]
- 3) humidité relative min [%]
- 4) humidité relative moyenne [%]
- 5) humidité relative max [%]
- 6) précipitations [mm]
- 7) température min [$^{\circ}\text{C}$]⁴
- 8) température moyenne [$^{\circ}\text{C}$]
- 9) température max [$^{\circ}\text{C}$]
- 10) vitesse du vent à 2 mètres du sol [m/sec]

¹ Source : CRA-W/Agromet.be

² Les pyranomètres qui équipent le réseau Pameseb mesurent le rayonnement solaire global dans une gamme spectrale allant de 400 à 1100 nm.

³ Calculée sur base de la formule FAO Penmann-Monteith.

⁴ Les sondes de température sous feuillage sont installées sous abris anti-radiations solaires, à environ 5 cm du sol.

B) La culture

Le fichier de culture de maïs utilisé est un fichier spécifique à la Wallonie (Sallah et al. 2019), les caractéristiques de la culture sont disponible en annexe (8.1). Afin de paramétrer la culture, Sallah et al. (2019) ont collecté des informations sur la couverture végétale fractionnée (par images satellitaires haute résolution), la biomasse sèche totale en surface du maïs et les informations de gestion du champ pour 40 champs de maïs en Wallonie entre 2015 et 2017.

Pour calibrer les paramètres, un outil informatique a été développé pour intégrer ces données dans le modèle AquaCrop, en tenant compte des pratiques de gestion agricoles fournies. Cette démarche a impliqué l'ajustement des paramètres du modèle AquaCrop en alignant les dates d'émergence des plants de maïs avec les observations satellitaires et en tenant compte de la couverture végétale des mesures satellitaires au cours de la saison. Cela avait pour but de refléter au mieux les conditions spécifiques de la Wallonie. Ce modèle a ensuite été validé avec des données réelles des années précédentes.

C) Le sol

Le type de sol utilisé dans Aquacrop est le sol « Siltloam » qui correspond à un sol limoneux non caillouteux caractéristique de la partie nord de la Wallonie (figure 18). Les caractéristiques du sol « Siltloam » sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques du sol « Siltloam » du modèle de simulation Aquacrop

Caractéristique	Donnée et unité
Teneur en eau volumique ⁵ au point de saturation en eau	46%
Teneur en eau volumique à la capacité au champ	33%
Teneur en eau volumique au point de flétrissement permanent	13%
Réserve utile en eau	200 mm/m
Conductivité hydraulique à saturation	575 mm/jour
Groupe hydrologique	Groupe 'B'
Curve number de base	61
REW (eau facilement évaporable)	11 mm
Zone d'évaporation maximal du sol	0,3 mètre

⁵ Indique la proportion du volume d'eau par rapport au volume total de sol

Le point de saturation en eau est le niveau d'humidité pour lequel le sol est complètement saturé en eau. La capacité au champ est la quantité maximale d'eau que le sol peut retenir après avoir été saturé et que l'excès d'eau a été drainé. Le point de flétrissement est le niveau d'humidité où les plantes ne peuvent plus absorber l'eau du sol. La réserve utile représente la quantité d'eau retenue dans le sol disponible pour la plante en eau et équivaut à la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. La conductivité hydraulique du sol est la mesure de la facilité avec laquelle l'eau peut traverser ses pores, elle est influencée par la texture du sol et sa structure.

Dans la suite, l'épaisseur du sol et la charge caillouteuse seront spécifiées en fonction des différents scénarios. En effet, l'épaisseur du sol et la charge caillouteuse impacte le stock d'eau du sol. La charge caillouteuse impacte également la conductivité hydraulique du sol à travers ses différentes couches. Enfin, Aquacrop permet de modéliser plusieurs couches. Dans cette étude, il a cependant été choisi d'utiliser une seule couche uniforme.

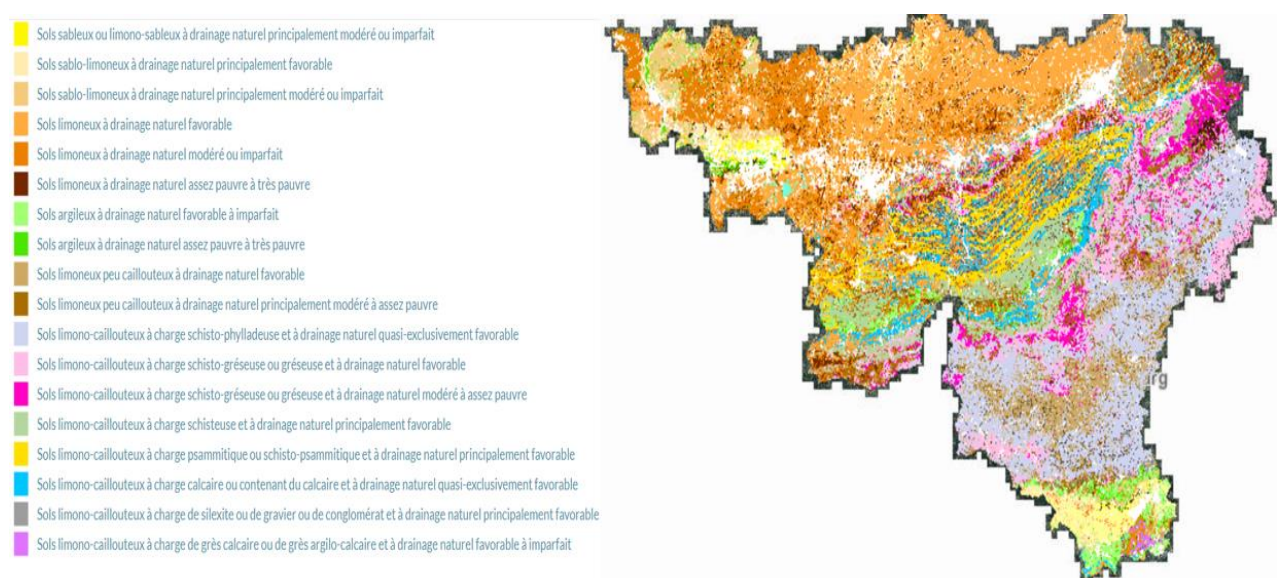


Figure 18 : Carte des principaux types de sols de Wallonie à 1:250.000 (WalOnMap, 2024)

D) Autres paramètres

1. Date de semis et période de simulation

La date de semis fixée pour cette étude a été arbitrairement choisie comme étant le 25 avril. En Belgique, le maïs est généralement semé entre la mi-avril et la mi-mai (Sallah et al. 2019; CIPF, 2024b). La durée du cycle, selon le fichier du maïs calibré en Wallonie, est de 160 jours. La date de récolte est le 02 octobre, ce qui concorde avec les dates de récoltes typiquement observées en Wallonie. En effet, les dates de récoltes se situent entre septembre et mi-novembre pour la récolte, la majorité des récoltes se fait cependant en octobre (Sallah et al. 2019; CIPF, 2024b).

Au début d'une simulation, Aquacrop considère tout le sol comme étant à sa capacité au champ. Cependant, cette hypothèse ne reflète généralement pas les conditions réelles du sol. Pour pallier à cet aspect et reproduire de manière plus fidèle les conditions du sol au moment du semis, les simulations débutent le 25 février soit deux mois avant la date de semis. Cet ajustement permet au modèle de simuler l'évolution des conditions du sol, offrant une représentation plus précise de l'état du sol au moment du semis.

Cette situation amène cependant à un inconvénient. En effet, comme le CN ne peut pas être modifié une fois la simulation lancée, le sol est considéré avec le CN « ajusté » des micro-dépressions deux mois avant son implémentation sur le terrain.

2. Aquifères

Aquacrop ne considère plus de mouvement ascendant d'eau par capillarité depuis les aquifères dus aux eaux souterraines à partir de 4 mètres de profondeur pour des conditions pluviométriques normales en Wallonie. Les eaux souterraines de nos régions sont situées en général assez profondément dans le sol (les eaux souterraines situés dans la région du Hesbaye se trouvent entre 30 et 60 mètre de profondeur (Mohamed et al., 2007)). À cet égard, l'hypothèse est posée que les eaux souterraines ne sont pas interférées par les bilans hydriques des sols simulés ici.

3. Irrigation

Aquacrop comprend également une section irrigation pour les cultures mais ce mémoire portant sur l'effet de la sécheresse sur le maïs. Il est ici estimé qu'aucune irrigation n'est apportée, ce qui est en principe le cas en Wallonie.

4. Gestion de champs

Ce paramètre permet de spécifier d'éventuels pratiques mise en place sur le champ telles que la couverture du sol par paillis ou des pratiques influençant le ruissellement. On retrouve également les effets des mauvaises herbes et le stress lié à la fertilité du sol. En Wallonie, il y a généralement assez de nutriments apportés sur les cultures de maïs et les mauvaises herbes sont globalement assez bien éliminées suite à des passages répétés à la bineuse ou à des traitements herbicides (CIPF, 2024b). Un cas idéal avec 0% de mauvaises herbes et 0% de stress lié à la fertilité du sol est donc posé.

E) Considération du stress sur le maïs

Afin d'évaluer l'impact des conditions environnementales sur la plante, Aquacrop divise le stress que celle-ci peut subir en 4 types : le stress hydrique, le stress lié à la température, le stress lié à la fertilité et la stress lié à la salinité. Ces deux derniers ne sont pas concernés dans l'étude, la fertilité étant optimale et la salinité considéré comme égal à 0.

1. Le stress hydrique

Aquacrop considère l'effet du stress hydrique sur différents aspects de la croissance des plantes : l'expansion du couvert végétal, la fermeture stomatique et la sénescence précoce du couvert végétal. Les effets du stress hydrique sur la plante sont modélisés à l'aide de plusieurs coefficient de stress hydrique 'Ks' (Eq. 1). Ces coefficient varient entre 1 (pas d'effet de stress) et 0 (effet de stress complet), en fonction des seuils de déplétion en eau du sol dans la zone racinaire.

Eq. 1⁶ :

$$K_s = 1 - \frac{p - p_{upper}}{p_{upper} - p_{lower}}$$

Où p représente la fraction de l'eau disponible totale (TAW) qui a été épuisé. p_{upper} représente le seuil de la TAW qui peut être épuisée avant que le stress hydrique ne commence à affecter un processus de croissance spécifique. p_{lower} représente la fraction de la TAW qui, lorsqu'elle est épuisée, indique que le stress hydrique a atteint son effet maximal sur un processus de croissance spécifique.

⁶ L'équation démontre le coefficient de stress hydrique lorsqu'il est linéaire, ce qui correspond au fichier de culture utilisé dans cette étude. Cependant, il peut également être convexe ($K_s = (1 - \frac{p - p_{upper}}{p_{upper} - p_{lower}})^\alpha$).

Au niveau du couvert végétal, p_{upper} est la fraction de TAW qui peut être épuisée avant que l'expansion des feuilles ne commence à être limitée, elle vaut 0,14. P_{lower} est la fraction de la TAW au-delà de laquelle l'expansion des feuilles cesse complètement, elle vaut 0,74.

Au niveau de la fermeture stomatique, P_{upper} est la fraction de TAW où les stomates commencent à se fermer pour réduire la perte d'eau par transpiration, elle vaut 0,69. P_{lower} est la fraction de la TAW au-delà de laquelle les stomates se ferment complètement, elle vaut 1.

Au niveau de la sénescence précoce du couvert, P_{upper} est égale à la fraction de TAW pouvant être épuisée avant que la sénescence du couvert ne soit déclenchée, elle vaut 0,69. P_{lower} est fixé à 1.0, à ce stade, la teneur en eau du sol atteint le point de flétrissement permanent et la sénescence du couvert est à son maximum.

2) stress lié à la température

AquaCrop prend en compte les effets des températures basses sur la croissance et le développement des cultures de deux manières. D'abord, il utilise les degrés-jours de croissance pour évaluer leur impact sur les différentes phases de croissance des cultures, comme la floraison et la maturité. Ensuite, il évalue l'effet direct des températures basses sur la capacité des plantes à transpirer en utilisant un coefficient K_s , qui varie de 1 à 0 selon la gravité du stress thermique. Le stress thermique peut également affecter la pollinisation. Le stress de température est à nouveau spécifié par un coefficient K_s , égal à 0 pour une température de 10°C et égal à 1 pour une température de 40°C.

4.2 Implémentation du rouleau anti-érosif dans Aquacrop et détermination de la relation du curve number en fonction de la pente

4.2.1 Le Curve number

La seule manière dont Aquacrop permet de modifier la surface du sol se situe dans la section « pratiques de terrain » et consiste en l'intégration de diguettes (telles qu'utilisées en rizières) qui stockent l'excès d'eau et empêchent donc le ruissellement. Ces diguettes peuvent être modifiées uniquement par incrément de 1 centimètre. Or, la quantité d'eau supplémentaire stockable par les micro-dépressions (depression storage) est de quelques millimètres seulement (Bélis, 2018). Le rouleau anti-érosif ayant pour but premier la diminution du ruissellement (en augmentant le stockage superficiel du sol), la manière choisie pour implémenter cette technique dans Aquacrop a été la modification de la valeur du curve number entre le rouleau et le témoin.

Le curve number est un paramètre empirique en hydrologie, développé par l'USDA, utilisé pour prédire le ruissellement direct et l'infiltration à partir d'une pluie. Il est largement utilisé et permet d'estimer la quantité de ruissellement direct à la suite d'un événement pluvieux dans une zone donnée (ASCE et EWRI, 2009) (Eq. 2, 3 et 4). Le CN varie entre 30 et 100 .

$$\text{Eq. 2 : } Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S}$$

$$\text{Eq. 3 : } S = \frac{(25400-254*CN)}{CN}$$

$$\text{Eq. 4 : } Ia = \lambda * S$$

Où :

- Q = quantité d'eau ruisselée [mm]
- P = quantité de précipitations [mm]
- CN = curve number
- Ia = abstraction initiale [mm], qui correspond à la rétention d'eau du sol avant que le ruissellement ne commence.
- S = potentiel de rétention maximale de l'humidité du sol [mm]
- λ = coefficient de l'abstraction initiale

Le coefficient λ était historiquement défini comme étant égal à 0,2 mais de nombreuses études récentes ont démontré que l'initial abstraction donnait des résultats plus adéquats pour un λ équivalent à 0,05 (Ling et Yusop, 2014; Woodward et al., 2003). Aquacrop utilise cette valeur de $\lambda = 0,05$ dans son modèle. C'est également le cas dans l'étude de Clément et al. (2023), car elle minimise la somme des carrés des résidus. L'équation du ruissellement (Eq. 2) devient alors :

$$\text{Eq. 5 :} \quad Q = \begin{cases} 0 & \text{pour } P < 0,05 S \\ \frac{(P-0,05*S)^2}{(P-0,05*S)+S} & \text{pour } P > 0,05 S \end{cases}$$

Le curve number dépend principalement de 2 facteurs ; la condition hydrologique du sol et l'occupation du terrain. Les sols sont divisés en 4 groupes hydrologiques (tableau 2). Le groupe A correspond aux sols bien drainés, généralement les sols sableux. Le groupe B correspond aux sols à infiltration modéré, généralement les sols limoneux bien drainés. Le groupe C correspond à des sols à infiltration lente, avec des couches qui entravent le mouvement de l'eau. Enfin, le groupe D correspond aux sols à infiltration très lente.

Tableau 2 : KSat et CN par défaut pour les différents groupes hydrologique du sol⁷

Groupe hydrologique du sol	Conductivité hydraulique saturé (Ksat) [mm/jour]	CN par défaut pour AMC II
A	> 864	46
B	864 – 347	61
C	346 – 36	72
D	≤ 35	77

Le curve number est différent selon que le sol se situe en zones urbaines, agricoles ou boisées. Pour les zones non urbaines, le CN est également influencé par le pourcentage de terrain couvert. Afin d'obtenir le CN théorique d'un sol, l'USDA utilise une combinaison entre l'occupation du terrain et le groupe hydrologique du sol. Ainsi, selon ces tables, le CN pour un sol de classe hydrologique B (correspondant généralement aux sols limoneux) avec une culture de maïs en ligne varie théoriquement entre 78 et 81.

7. Les termes AMC I, II et III représentent les conditions d'humidité antécédente du sol avant une pluie. AMC I correspond à un sol très sec avec peu ou pas d'humidité résiduelle, ce qui permet une infiltration maximale et un CN bas. AMC II désigne des conditions normales d'humidité antécédente, il représente la référence standard pour la plupart des calculs de CN, avec un sol ni trop sec ni trop humide. AMC III se réfère à un sol humide en raison de récentes précipitations, réduisant la capacité d'infiltration et résultant en un CN élevé.

Les pratiques agricoles ainsi que la pente peuvent également modifier le curve number d'un sol. Plus le sol est pentu, moins l'eau aura tendance à rester sur celui-ci en raison de la gravité, ce qui réduit le temps disponible pour l'infiltration. Le CN est modifié en fonction de la pente selon la formule (Eq. 6, 7 et 8) développée par Sharpley & Williams (1990).

$$\text{Eq. 6}^8: \quad CN_{II\alpha} = \frac{1}{3} (CN_{III} - CN_{II})(1 - 2e^{-13,86\alpha}) + CN_{II}$$

Où :

$$\text{Eq. 7 :} \quad CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281 * CN_{II}}$$

$$\text{Eq. 8 :} \quad CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 + 0,00573 * CN_{II}}$$

4.2.2 Détermination d'un curve number spécifique à la Wallonie

L'étude de Clément et al. (2023), qui se base sur des essais du CIPF, a été utilisée afin de déterminer la valeur d'un CN spécifique de la région limoneuse de la Wallonie pour un champ témoin et un champ traité par le rouleau anti-érosif. Pour ce faire, Clément et al. (2023) ont évalué l'effet sur le CN de l'implantation des micro-dépressions dans un total de 14 duos sites*années (à Huldénberg, Ittre, Ottignies, Hennuyères et Virginal) avec des pentes variant entre 9 et 16%, le tout entre 2012 et 2019. Les CN ont été déterminés par la méthode de la CN médiane à partir de 209 événements pluvieux potentiellement générateurs de ruissellement qui ont eu lieu durant les essais (en utilisant la valeur moyenne de ruissellement de chaque traitement).

La valeur du CN est de 69 pour le témoin et de 63 pour le rouleau (Figure 19). Ce jeu de données ne permet pas de mettre en évidence un effet 'pente' sur le CN car l'effet type de sol était confondu avec l'effet pente. Les CN en fonction de la pente sont calculés dans le point suivant afin de simuler les scénarios pour différentes pentes en Wallonie.

⁸ α correspond à la pente. CN_I est le curve number utilisé lorsque les conditions correspondent à AMC I. CN_{III} est le curve number utilisé lorsque les conditions correspondent à AMC III.

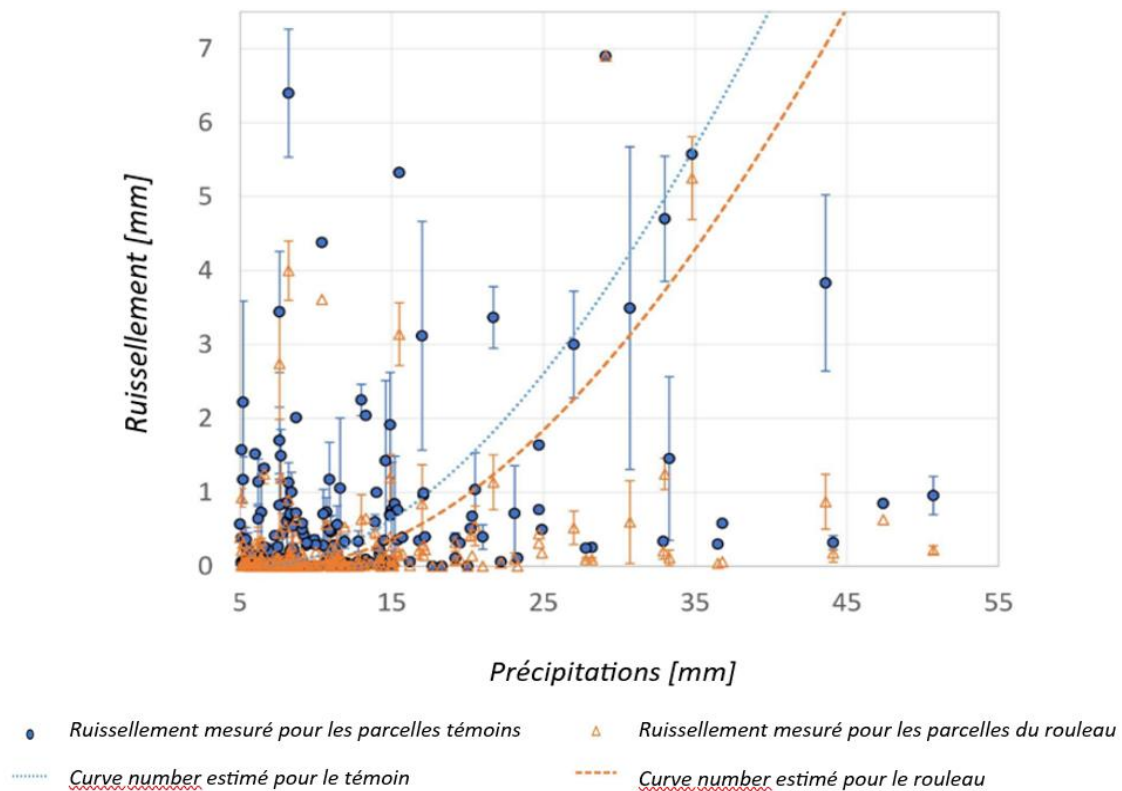


Figure 19 : Données de ruissellement pluvial mesurées et courbes numbers pour les nombres médians de courbes ajustées ($\lambda = 0,05$), pour les traitements de contrôle et les traitements au rouleau dans la culture du maïs. Les valeurs de ruissellement mesurées sont des moyennes sur l'ensemble des répétitions de parcelles. Les barres d'erreur correspondent aux écarts types. Les points sans barres d'erreur correspondent à des expériences sur une seule parcelle (sans répétitions). Seuls les événements pluvieux > 5 mm ont été pris en compte. (Clément et al., 2023)

4.2.3 Calcul du CN du rouleau en fonction de la pente

La fraction de l'eau qui s'infiltre par rapport aux précipitations étant déterminée par le CN, l'eau supplémentaire pouvant être infiltrée grâce aux micro-dépressions est d'abord calculée, puis, le CN du rouleau est déterminée en fonction de cette quantité d'eau. Ceci se fera en 3 étapes ; premièrement en calculant la quantité d'eau stockable dans ces micro-dépressions grâce au rouleau. Deuxièmement, en ajustant cette quantité d'eau stockable pour le sol spécifique considéré dans le point 4.2.2. Troisièmement, en calculant le nouveau CN directement grâce à la quantité d'eau supplémentaire pouvant être infiltré.

A) Quantité d'eau stockée dans les micro-dépressions en fonction de la pente

Les valeurs de l'étude de Clément et al. (2023) sont pour des sites ayant une pente moyenne de 12,5%. Calculer le CN d'un sol en fonction de la pente est possible avec l'Eq. 6, cependant, la quantité d'eau stockable dans les micro-dépressions varie en fonction de la pente et doit être prise en compte. L'Eq. 6 ne peut donc pas être utilisée pour le rouleau et il faut premièrement évaluer comment ce stock d'eau diminue en fonction la pente. Pour ce faire, le mémoire de Bélis (2018) a été utilisé. Bélis (2018) a caractérisé une relation entre le stockage superficiel maximal des dépressions (appelé DSmax par la suite) et la pente (figure 20), en se basant sur des essais du CIPF. Le DSmax se réfère au volume d'eau maximal (en mm) stockable dans les dépressions à la surface du sol.

Pour arriver à cette relation, Bélis a d'abord modélisé le relief créé par le rouleau antiérosif par photogrammétrie afin de calculer la capacité de stockage de la parcelle en la soumettant à une pluie simulée. Il a ainsi pu définir la rétention maximale dans les dépressions pour plusieurs pentes. Enfin, en divisant le volume d'eau stocké dans les dépressions par la superficie du modèle numérique de terrain, il a obtenu le DSmax pour différentes pentes. De manière générale, les micro-dépressions seules ne sont pas responsables de l'entièreté de la rétention de surface de l'eau. Mais, comme celles-ci participent à la grande majorité du DSmax, l'hypothèse que tout le DSmax est lié aux micro-dépressions est faite.

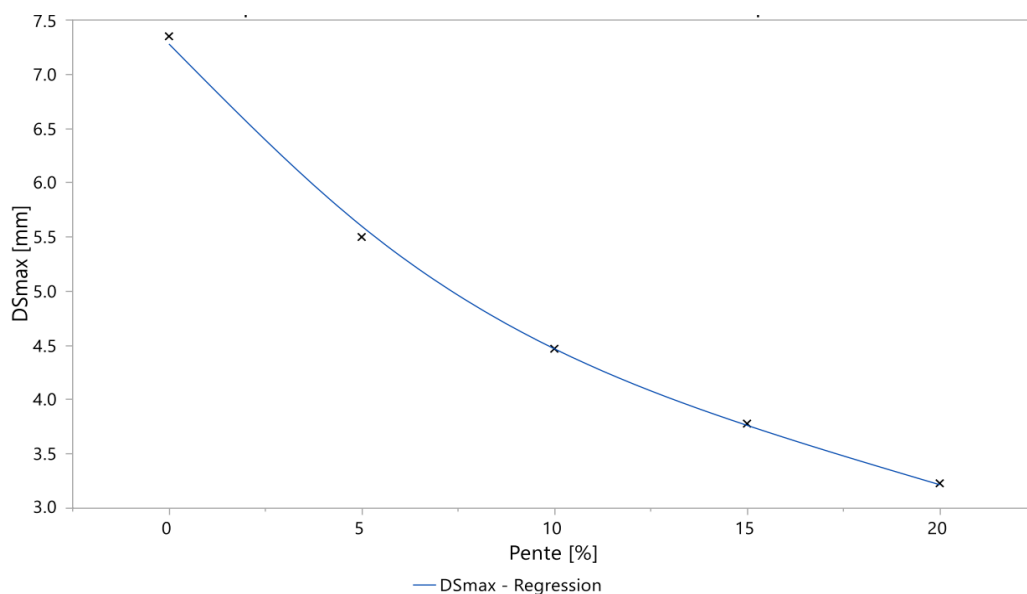


Figure 20 : Capacité de rétention maximale des micro-dépressions (Dsmax) en fonction de la pente. Cette relation a été obtenue en simulant la quantité d'eau maximale pouvant être stocké dans les dépressions pour 5 pentes simulées, elle correspond au site de Jurbise dans l'étude de Bélis (2018)

B) Ajustement de la relation du curve number pour un sol spécifique du point 4.2.2

La relation de la figure 20 a été déterminée pour un site, il était par conséquent nécessaire d'évaluer si celle-ci correspond à la différence du CN entre le témoin (CN = 69) et le rouleau (CN = 63) pour un sol spécifique de la région limoneuse. Pour ceci, la différence de l'abstraction initiale entre le témoin et le rouleau est calculée (Eq. 2). L'abstraction initiale correspond à la rétention d'eau du sol avant que le ruissellement ne commence. Elle se base sur l'infiltration directe dans le sol, l'interception des précipitations par la végétation et le stockage superficiel dans les dépressions du sol. Dans cette étude, le sol et la végétation sont les mêmes (le rouleau et le témoin étant sur les mêmes terrains lors des essais), la différence d'initiale abstraction entre le témoin et le rouleau est donc attribuable uniquement aux dépressions des micro-dépressions. La quantité d'eau stockée dans les micro-dépressions détermine la différence entre l'abstraction initiale du rouleau et du témoin.

Dans le cas de l'étude de Clément et al. (2023), la différence d'abstraction initiale est égale à 2,25 mm, et cette différence vaut 4,1mm dans la relation de Bélis (2018) (figure 20) pour une même pente. La relation de Bélis (2018) semble donc « surestimer » la capacité de stockage par rapport à l'étude de Clément et al. (2023) qui considère un nombre élargi de site.

Par conséquent, la courbe a été ajustée en calculant les Dsmax théoriques pour l'étude de Clément et al. (2023) (figure 21). Ce calcul consiste à multiplier les Dsmax de l'étude de Bélis par un facteur de 0,55 (2,25 sur 4,1). De cette manière, une relation correspondant à la différence de CN entre le témoin et le rouleau pour un sol limoneux Wallon spécifique est obtenue, en se basant sur la quantité supplémentaire d'eau pouvant être infiltrée.

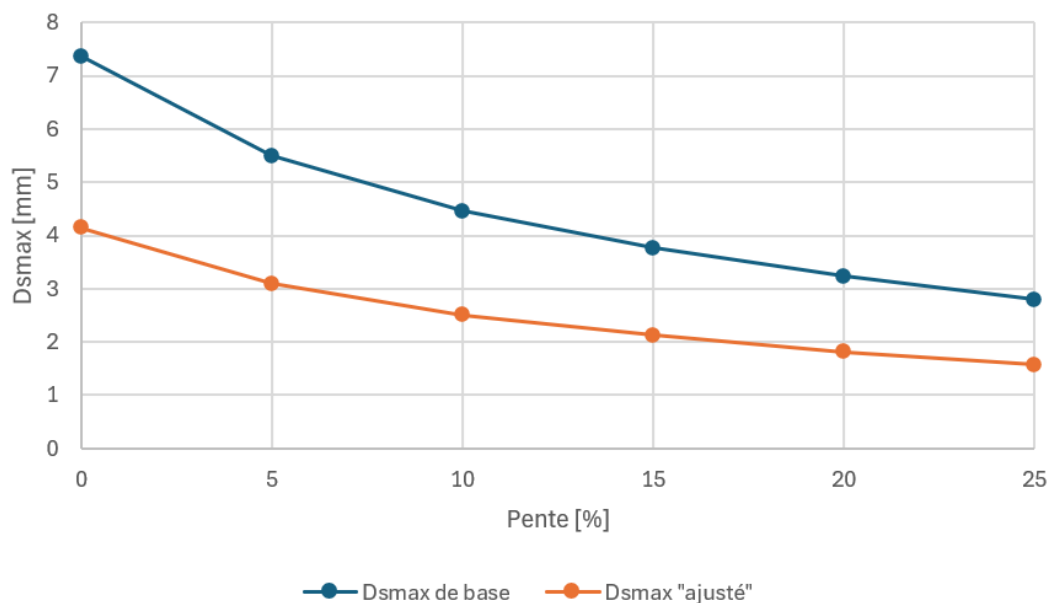


Figure 21 : Graphique représentant la relation du Dsmax en fonction de la pente de l'étude de Bélis et la relation du Dsmax « ajusté » pour l'étude de Clément et al. (2023). Le rapport entre les 2 courbes est de 0,55.

Les différents Dsmax (figure 21) correspondent donc à la différence d'abstraction initiale entre les parcelles témoins et les parcelles « rouleau ». L'abstraction initiale supplémentaire donnée par la quantité d'eau stockable dans les micro-dépressions permet d'expliquer la différence entre le CN témoin (CN = 69) et le CN du rouleau (CN = 63) pour la pente moyenne de l'étude de Clément et al. (2023). Les Dsmax obtenus sont disponibles en annexe (8.2).

C) Calcul du curve number

Maintenant que l'on sait comment le stockage des micro-dépressions varie en fonction de la pente, il reste à calculer le curve number du rouleau en fonction de la pente. Voici les différentes étapes :

1. Calcul du CN du témoin pour différentes pente à partir de l'Eq. 6.
2. A partir de ces CN, calcul des abstractions initiales du témoin à partir des Eq. 3 et 4.
3. Addition des Dsmax aux abstractions initiales pour obtenir les abstractions initiales du rouleau (l'abstraction initiale du rouleau correspond à la quantité d'eau maximale stockable par les dépressions ajoutée à l'abstraction initiale du témoin).
4. Détermination des CN du rouleau à partir des Eq. 3 et 4 et des abstraction initiales du rouleau.

Tous les résultats liés à ces calculs se trouvent en annexe (8.2). Le sol choisi dans Aquacrop « Silt loam » (pour un sol de référence plat) a une valeur de CN par défaut de 61, ce qui est cohérent avec la valeur trouvée ici de 60,3.

4.2.4 Relation du CN en fonction de la pente pour le rouleau anti-érosif « amélioré »

Enfin, afin d'approfondir le second sous-objectif, il est intéressant de visualiser la manière dont le CN diminuerait si les micro-cuvettes étaient plus profondes. Pour ceci, l'étude de Bélis (2018) est à nouveau utilisée. En effet, dans celle-ci, une parcelle a été traitée avec des micro-dépressions de 10 centimètres de profondeur là où le design de base du rouleau anti-érosif est prévu pour faire des micro-dépressions de 6 centimètres de profondeur. La capacité de rétention maximale des micro-dépressions de 10 centimètres est relativement plus importante que celle calculée précédemment (figure 22). En suivant la méthodologie du point 4.2.3, on obtient les CN en fonction de la pente pour des micro-dépressions de 10 cm (Annexe 8.3).

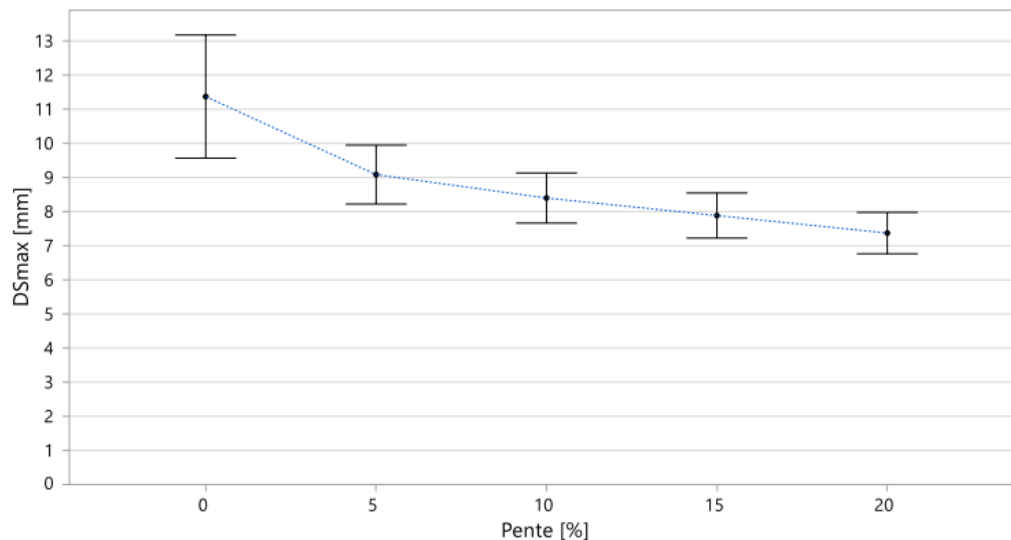


Figure 22 : Capacité de rétention maximale des dépressions pour des micro-cuvettes de 10cm de profondeur. les lignes verticales représentent l'écart-type. Ce graphique représente les résultats pour les répétitions de Marbaix dans l'étude de Bélis (2018)

4.3 Les scénarios simulés

Données météorologiques

Les simulations sont effectuées pour 10 scénarios différents basés sur la pluviométrie (entre le 25 février et le 02 octobre⁹) des années comprises entre 1999 et 2023. Les pluviométries ainsi que les températures et radiations moyennes de ces années se trouvent en annexe 8.4. Les scénarios sont les suivants :

- les 3 années les plus sèches sur la période considérée (2022, 2018 et 2013),
- une année « référence » à pluviométrie normale (2009),
- une année relativement humide (2002),
- l'année la plus humide (2008)¹⁰,
- un scénario où l'année la plus sèche (2022) est simulée avec une charge caillouteuse de 20% (diminuant ainsi sa réserve utile),
- 3 années à déficit hydrique prolongé¹¹.

⁹ Les ruissellements présentés dans les résultats sont donc calculés pour cette période.

¹⁰ Les années humides ont pour but d'évaluer la mitigation du ruissellement du rouleau anti-érosif dans des conditions de pluviométries élevées

¹¹ Les années à déficit hydrique prolongé sont des années simulées caractérisées par des précipitations de 10 mm tous les 5 jours et une période de 40 jours sans précipitations (déficit hydrique prolongé). La période de déficit varie pour les 3 scénarios. La période sans précipitation du premier scénario commence le 3 juin (soit 40 jours après le semis), celle du deuxième scénario le 13 juillet (80 jours après le semis), et celle du troisième scénario le 22 août (120 jours après le semis). Les autres variables météorologiques utilisées sont les données de l'année 2009. Il y a au total 360 mm précipités sur la période de simulation. Le but de ces années est de vérifier l'impact d'un déficit hydrique prolongé sur le maïs.

Le stress hydrique et ses impacts sur les cultures (sécheresse agricole) sont influencés non seulement par les précipitations, mais également par d'autres variables météorologiques comme la température, le rayonnement, l'humidité et le vent. C'est, au-delà des précipitations, une combinaison de ces facteurs qui peuvent favoriser un potentiel stress hydrique lié notamment à une évapotranspiration importante.

Dans ce mémoire, l'accent est mis sur la manière dont les rendements peuvent être impactés en se basant sur la pluviométrie sans que l'effet des différents facteurs ne soit pris en compte. Deux raisons expliquent ce choix. Premièrement, analyser comment le stress hydrique est impacté en fonction de cinq variables peut s'avérer fastidieux. Deuxièmement, les moyennes des autres variables sont globalement assez proches¹² pour chaque année, contrairement à la pluviométrie.

Autres paramètres

La charge caillouteuse et l'épaisseur du sol sont modifiées selon les scénarios afin de vérifier l'effet d'un déficit de précipitation sur les cultures en fonction de ces variables. Cet ajustement permet également de représenter un plus large éventail de sols en Wallonie, notamment les sols limono-caillouteux (figure 18). En Wallonie, les sols limoneux et limono-caillouteux représentent environ 60% de la superficie totale, les sols sablo-limoneux représentent environ 30% et les sols argileux occupent les 10% restants (WalOnMap, 2024). La charge en éléments grossiers d'un sol limono-caillouteux se situe entre 15 et 50% (Legrain, 2007), elle est considérée ici comme étant égale à 20%.

A) Comparaison rendement témoin et rouleau (sous-objectif 1)

Différentes épaisseurs de sol (1,6 mètre ; 1,2 mètre ; 1 mètre et 0,8 mètre) sont testées pour les 10 scénarios décrits. Par soucis de simplicité, ces 10 scénarios sont regroupés en 3 catégories : les années sèches (2022, 2022 à charge caillouteuse, 2018 et 2013), les années à déficit hydrique prolongé et les années humides (2002, 2008 et 2009). En plus des rendements et du ruissellement, l'évapotranspiration, le stress hydrique et le stress dû à la température ont été notés pour chacune des simulations (annexe 8.5). Le but est ici d'évaluer si le rouleau aurait pu être utile durant les années simulées pour un sol limoneux wallon.

¹² L'année la plus chaude est de 14,8°C et la plus froide de 12,3°C; L'année la plus humide a obtenu une humidité moyenne de 81,7%, l'année la moins humide une moyenne de 67,3% ; l'année où la vitesse du vent est la plus élevée est de 2,75m/sec et l'année où la vitesse du vent est la moins élevée est de 1,33m/sec l'année avec le plus de rayonnement est de 1743J/cm²/jour et avec le moins de rayonnement de 1065J/cm²/jour. Source : Agromet

B) Indice de réserve hydrique (sous-objectif 1)

Les rendements et ruissellements du témoin et du rouleau sont également présentés sur base d'un indice de réserve hydrique dans les résultats. Cet indice est calculé de la manière suivante:

$$\text{Eq. 9 : indice de réserve hydrique (L/m}^2\text{)} = \text{réserve utile du sol du début de simulation}^{13} \text{ (L/m}^2\text{)} + \text{pluviométrie au cours de la saison (L/m}^2\text{)} - \text{Eto (L/m}^2\text{)} - \text{ruissellement (L/m}^2\text{)}$$

Un indice de réserve hydrique inférieur à zéro (Eq. 9)¹⁴ signifie que la plante n'a pas eu l'occasion de puiser assez d'eau par rapport à ses besoins. Un indice supérieur à zéro signifie qu'au terme de la saison, la plante a obtenu en moyenne assez d'eau pour répondre à ses besoins. Cependant, il est possible que la plante ait subi un stress hydrique durant une partie de la saison ayant pu entraîner des pertes de rendement comme dans le cas des années à déficit hydrique prolongé. Cet indice ne prend pas en compte la percolation et surestime donc en partie la quantité d'eau disponible pour la plante au cours de la saison.

C) Rendement du maïs en fonction du Curve number (objectif 2)

Comme mentionné au point 4.2.1, un même type de sol peut avoir des CN différents en fonction de ses conditions hydrologiques, de son occupation, de sa pente ou des pratiques agricoles qu'il subit. Afin de considérer les différents CN qu'un type de sol peut avoir, le rendement en fonction du CN est déterminé. Trois types de sols (limoneux, argileux et sablo-limoneux) sont simulés afin de représenter le maximum de sol présent en Wallonie.

Des CN 'minimaux' et 'maximaux' sont déterminés pour chaque type de sol. Les CN minimaux sont déterminés comme étant égaux à 50 car cette situation est rare pour des cultures de maïs. Au niveau des CN maximaux, les sols limoneux, classés généralement dans le groupe hydrologique « B », peuvent atteindre 86 pour des cultures labourées et sans résidus (USDA). Il est ici estimé qu'un sol limoneux pentu avec de mauvaises conditions hydrologiques peut atteindre un CN de 90 pour les simulations. Pour les sols argileux, classés généralement dans le groupe hydrologique « C », à cause de leur plus faible capacité d'infiltration, le CN passe à 91 pour des cultures labourées et sans résidus. Il est ici estimé qu'un sol argileux pentu avec de mauvaises conditions hydrologiques peut atteindre un CN de 95 pour les simulations. Enfin, les CN des sols sablo-limoneux peuvent atteindre 77. De la même manière, il est estimé que les CN maximaux des sols sablo-limoneux sont de 80 dans les simulations. A noter que ces cas 'maximaux' sont rares dans nos régions

¹³ Les différentes valeurs sont en annexe 8.6

¹⁴ Cet indice est calculé entre la date du début de simulation et la récolte

Les rendements sont simulés pour une gamme de valeurs de CN variant entre le CN minimal et maximale par incrément de 5 unités pour les différents scénarios. Cette approche permet de visualiser comment le rendement varie en fonction de la quantité d'eau disponible pour la plante. Ensuite, les écarts de rendements entre chaque différence de CN sont convertis sous forme de pourcentage par l'Eq. 10. La variation de CN représente la disparité entre le CN initiale d'un sol ("témoin") et le CN que ce même sol pourrait atteindre après avoir été soumis au passage du rouleau. Ces pourcentages sont calculés individuellement pour chaque différence de CN comme le montre la figure 23.

$$\text{Eq. 10 : \% de rendement supplémentaire} = \frac{\text{Rendement rouleau} \left(\frac{T}{ha}\right) - \text{rendement témoin} \left(\frac{T}{ha}\right)}{\text{rendement rouleau} \left(\frac{T}{ha}\right)}$$

CN	Témoin	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
Rouleau AE	Rendement fourrager (T/ha)	16,32	17,300	17,560	17,62	17,72	17,72	17,75	17,75	17,75	17,75
95	16,32										
90	17,300	5,83%									
85	17,560	7,32%	1,49%								
80	17,62	7,66%	1,83%	0,34%							
75	17,72	8,23%	2,40%	0,91%	0,57%						
70	17,72	8,23%	2,40%	0,91%	0,57%	0,00%					
65	17,75	8,39%	2,57%	1,08%	0,74%	0,17%	0,17%				
60	17,75	8,39%	2,57%	1,08%	0,74%	0,17%	0,17%	0,00%			
55	17,75	8,39%	2,57%	1,08%	0,74%	0,17%	0,17%	0,00%	0,00%		
50	17,75	8,39%	2,57%	1,08%	0,74%	0,17%	0,17%	0,00%	0,00%	0,00%	

Figure 23 : Matrice exprimant la différence de rendement pour différents CN sous forme de pourcentage pour un même type de sol. Le sol considéré est ici un sol argileux en année sèche.

Ces matrices permettent de visualiser la différence de rendement d'un certain CN à un autre. Ceci permet de considérer tous les scénarios possibles pour un type de sol, en considérant un large éventail de CN. La différence de CN maximale permise par le rouleau pour tous les types de sol n'a pas fait le sujet d'une étude. Il est ici considéré que les différences se situent entre 5 et 20 (voir point 5.2). Le but de ces matrices est de vérifier comment le rendement varie si le rouleau fait passer le CN d'un sol à un CN plus faible.

Les trois types de sols (limoneux, sablo-limoneux et argileux) sont simulés selon les conditions de l'année la plus sèche (2022), l'année normale (2009) et l'années à déficit hydrique prolongé 2 (80 jours après le semis). Les sols limoneux ont également été simulés pour l'année la plus humide (2008) et les années à déficit hydrique prolongé 1 et 3 (40 et 120 jours après le semis).

Au total, 36 matrices de rendements fourragers et 36 matrices de ruissellements en fonction du CN ont été créées. Les sols limoneux sont simulés pour 4 sols présentant des caractéristiques différentes : des sols de 1,2 mètre d'épaisseur, des sols de 1,2 mètre d'épaisseur à charge caillouteuse de 20%, des sols de 0,8 mètre d'épaisseur et des sols de 0,8 mètre d'épaisseur à charge caillouteuse de 20%. Les sols sablo-limoneux et argileux ont été

simulés pour des sols de 1,6 et 1,2 mètre (figure 24). Les sols limoneux, sablo-limoneux et argileux n'ont pas les mêmes profondeurs pour 2 raisons. Dans le cas des sols limoneux, les rendements ne sont quasiment pas affectés en fonction du CN pour les sols de 1,6 mètre et ne donnent donc pas de scénarios intéressants. Dans le cas des sols sablo-limoneux et argileux, les rendements sont économiquement non viables lorsque l'épaisseur des sols est inférieure à 1 mètre, selon les simulations. Une synthèse des scénarios des 2 sous-objectifs est en annexe (8.7).

Sol limoneux															
Année très sèche				Années à déficit hydrique prolongé (1,2 et 3)				Année normale				année humide			
épaisseur = 1,2 mètre		épaisseur = 0,8 mètre		épaisseur = 1,2 mètre		épaisseur = 0,8 mètre		épaisseur = 1,2 mètre		épaisseur = 0,8 mètre		épaisseur = 1,2 mètre		épaisseur = 0,8 mètre	
sans cailloux	avec cailloux	sans cailloux	avec cailloux	sans cailloux	avec cailloux	sans cailloux	avec cailloux	sans cailloux	avec cailloux	sans cailloux	avec cailloux	sans cailloux	sans cailloux	sans cailloux	sans cailloux

Sol sablo-limoneux					
Année très sèche		Années à déficit hydrique prolongé (2)		Année normale	
épaisseur = 1,6 mètre	épaisseur = 1,2 mètre	épaisseur = 1,6 mètre	épaisseur = 1,2 mètre	épaisseur = 1,6 mètre	épaisseur = 1,2 mètre

Sol argileux					
Année très sèche		Années à déficit hydrique prolongé (2)		Année normale	
épaisseur = 1,6 mètre	épaisseur = 1,2 mètre	épaisseur = 1,6 mètre	épaisseur = 1,2 mètre	épaisseur = 1,6 mètre	épaisseur = 1,2 mètre

Figure 24 : Scénarios du second sous-objectif

5 Résultats et discussions

Cette section présente l'ensemble des résultats relatifs aux objectifs posés précédemment, chaque résultat étant suivi d'une discussion. Premièrement, une comparaison entre les ruissellements et les rendements simulés par Aquacrop et ceux observés dans le cadre d'un projet mené par le CIPF sur l'impact du rouleau est présentée. Deuxièmement, les courbes de ruissellement calculées pour un sol spécifique de la région limoneuse wallonne, pour différentes pentes, pour le rouleau et le témoin, sont exposées. Troisièmement, les résultats liés aux différences de rendement et de ruissellement entre le témoin et le rouleau anti-érosif sont présentés pour différents scénarios. Enfin, une analyse des situations où le rouleau anti-érosif peut être intéressant en termes d'amélioration du rendement est effectuée.

5.1 Comparaison rendements du CIPF et simulations Aquacrop

5.1.1 Résultats

A. Ruissellement mesuré du projet CIPF et simulations Aquacrop

Les résultats ci-dessous proviennent du projet du CIPF lancé en février 2012. Ce projet s'inscrivait dans un cadre de lutte contre le ruissellement et l'érosion dans les cultures de maïs en région wallonne. Durant celui-ci, le CIPF a testé, entre 2012 et 2016, l'efficacité de plusieurs méthodes ayant pour but de réduire le ruissellement¹⁵.

Les figures 25 et 26 illustrent les variations du ruissellement entre les parcelles où le rouleau a été mis en place et les parcelles témoins pour le projet du CIPF et pour les simulations Aquacrop. Il en ressort que les ruissellements observés et simulés présentent des tendances similaires que ce soit sur les quantités obtenues par année pour le témoin et le rouleau ou pour les taux de diminution de ruissellement entre les deux traitements. Les taux de diminution sont cependant en moyenne 21% plus élevés pour les essais du CIPF.

¹⁵ *Durant le projet, deux sites expérimentaux étaient utilisés chaque année. Ces sites ont été choisis sur base de leur potentiel risque d'érosion. Les essais ont été menés en bandes parallèles de 25 mètres de long sur 3 mètres de large (correspondant à 4 lignes de semis) et ont été délimités à l'aide de rouleaux de plastique rigide. Ce plastique ont servis à cloisonner les différentes parcelles d'essais et à les protéger d'un potentiel ruissellement venant de l'extérieur. Durant l'expérience, les volumes d'eau ont été récoltés dans des bacs et ont été précisément quantifiés à l'aide d'une pompe et d'un débitmètre, un pluviomètre a également été installé sur le champ d'essai (rapport CIPF 2012).*

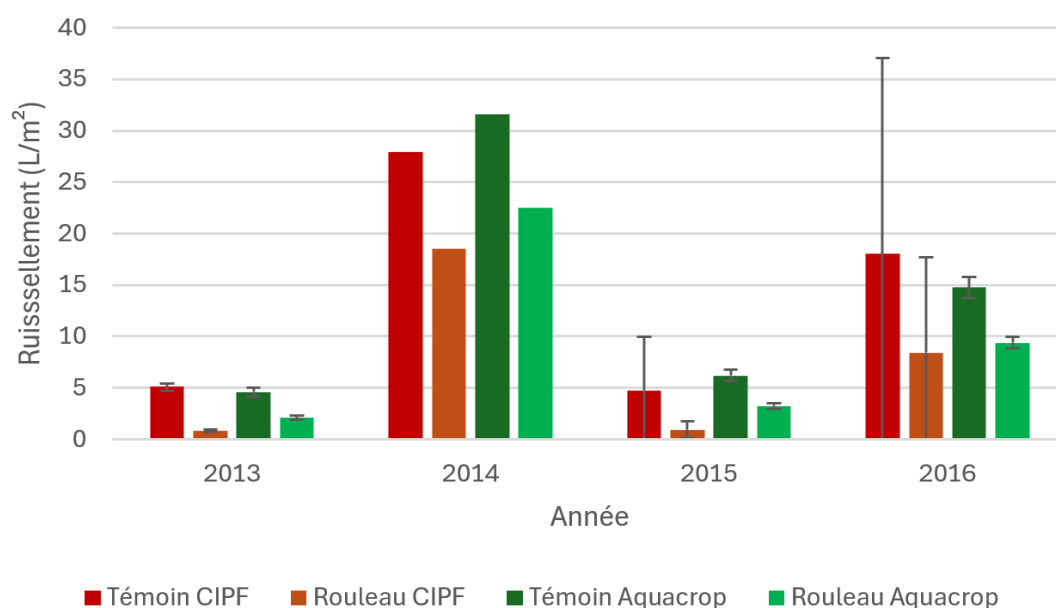


Figure 25 : Comparaison du ruissellement (en L/m^2) entre le témoin et le rouleau anti-érosif pour le projet CIPF et les simulations Aquacrop entre 2013 et 2016. Le ruissellement est mesuré sur la période comprise entre l'implémentation des micro-dépressions et la récolte de la culture.¹⁶

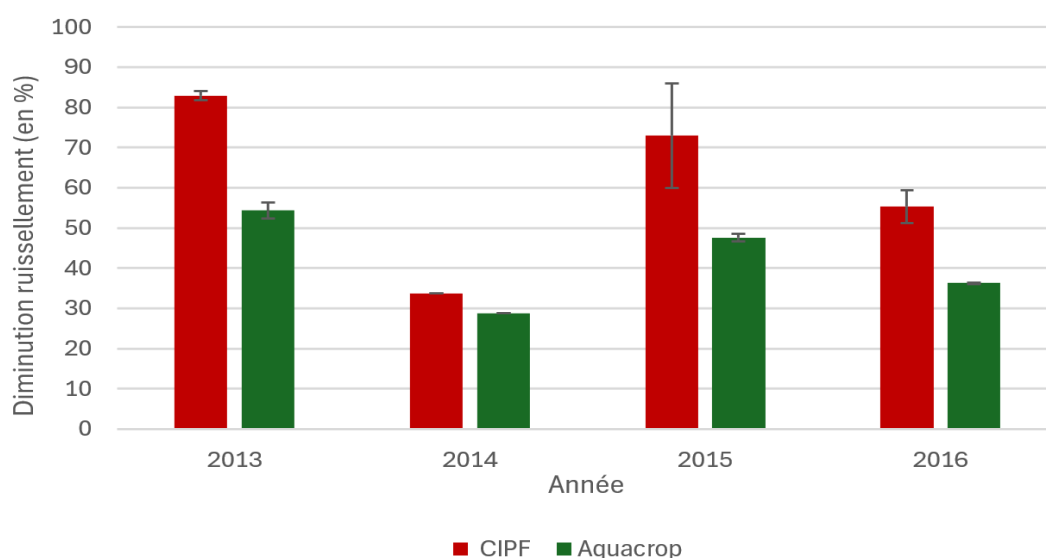


Figure 26 : Comparaison du pourcentage de diminution du ruissellement (en L/m^2) entre le témoin et le rouleau anti-érosif pour le projet CIPF et les simulations Aquacrop entre 2013 et 2016. Le ruissellement est mesuré pour la période comprise entre l'implémentation des micro-dépressions et la récolte de la culture.

¹⁶ Les essais ont été réalisés sur des sites situés à Ottignies et Virginal en 2013, à Ottignies en 2014, et à Ottignies et Ittres en 2015 et 2016. Les sites du CIPF se situent à moins de vingt kilomètres de la station météorologique de Louvain-la-Neuve dont les données ont été utilisées pour les simulations Aquacrop. Il peut donc être estimé qu'ils ont bénéficié des mêmes conditions météorologiques. Les sites de Virginal et d'Ittres ont des pentes de 11%, le site d'Ottignies a une pente de 16%. Les ruissellements mesurés par Aquacrop ont été effectués pour des sols limoneux de pente égale à ces différents sites. Le curve number (CN) calculé est de 68,5 pour le témoin et de 61,3 pour le rouleau pour les sites à 11% et de 69,7 pour le témoin et de 62,7 pour le rouleau pour le site d'Ottignies. Les CN pour le témoin et le rouleau des différents sites n'ont pas été renseignés par le CIPF ce qui ne permet pas de comparer les CN calculés et observés. Ces essais ont été menés sur des bandes de 72 m². Les écart-types sont construits sur base de la moyenne des essais (2 par année sauf en 2014). Les données proviennent des rapports du CIPF.

B. Comparaison des rendements en biomasse total du projet CIPF et simulations Aquacrop

Pour certains sites, des rendements comparant les parcelles témoins et les parcelles « rouleau anti-érosif » ont été rapportés dans le rapport, donnant une première idée de l'impact du rouleau anti-érosif sur le rendement. Ces rendements observés sont à nouveau comparés aux rendements simulés par Aquacrop (figure 27). Une profondeur de 1,6 m est considérée pour le sol dans les simulations Aquacrop. Les caractéristiques de ces sols se trouvent au point 4.1.2.

Les rendements Aquacrop ont tendance à être relativement supérieurs aux rendements observés durant le projet CIPF (en moyenne 4,35 t/ha plus élevés). Une différence de 1,5 tonne est observée entre le rendement maximal et minimum pour les rendements simulés entre les différentes années, contre 6,2 t/ha pour les rendements observés. Au niveau des différences de rendement entre le témoin et le rouleau, on observe que les rendements simulés sont sensiblement les mêmes. Les rendements observés sur les différents sites ont, en moyenne, une différence de 0,4 t/ha entre le témoin et le rouleau. On remarque cependant que c'est principalement l'année 2017 qui participe à cette augmentation de rendement car cette moyenne chute à 0,087 t/ha si on enlève 2017.

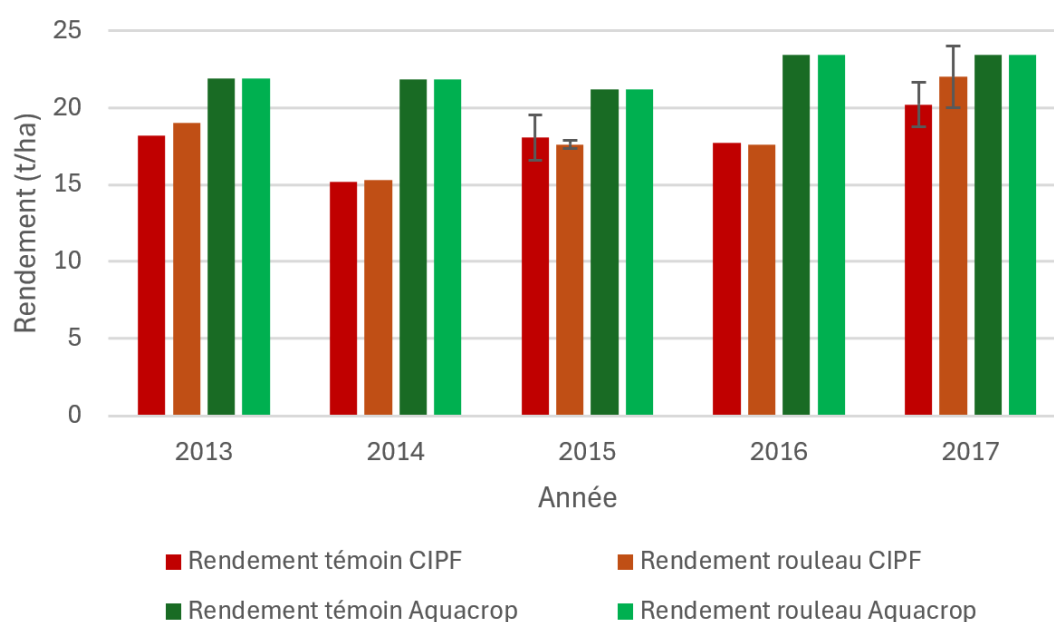


Figure 27 : Comparaison entre les rendements fourragers (biomasse totale du maïs) du rouleau anti érosif et du témoin pour différents sites entre les essais CIPF et les simulations Aquacrop. Les écart-types sont construits sur base de la moyenne des essais. Les données proviennent du rapport du CIPF 2017.

C. Comparaison élargie des rendements observés par le CIPF et simulés par Aquacrop

Sur sols limoneux

Les rendements observés précédemment par le CIPF ont pu donner une idée de la différence de rendement entre le rouleau et le témoin. Mais, ces rendements ayant trait à un ou deux sites par année, ils ne sont surement pas très représentatifs de la moyenne en Wallonie. Afin d'avoir une idée plus précise de la relation entre les rendements simulés par Aquacrop et les rendements observés en Wallonie, les rendements observés pour un nombre de sites plus conséquent et un nombre d'années élargi sont maintenant comparés (figure 28 et 29). Ces rendements sont également comparés en fonction de la pluviométrie afin de voir comment celle-ci influence les rendements (figure 30). Le nombre de sites est en moyenne de 29 par année.

En moyenne, les simulations Aquacrop dépassent de 4,1 t/ha les rendements moyens du CIPF et de 0,7 t/ha les rendements maximaux. Les rendements maximaux et moyens du CIPF suivent une tendance similaire mais diffèrent généralement des rendements Aquacrop (figure 28 et 29).

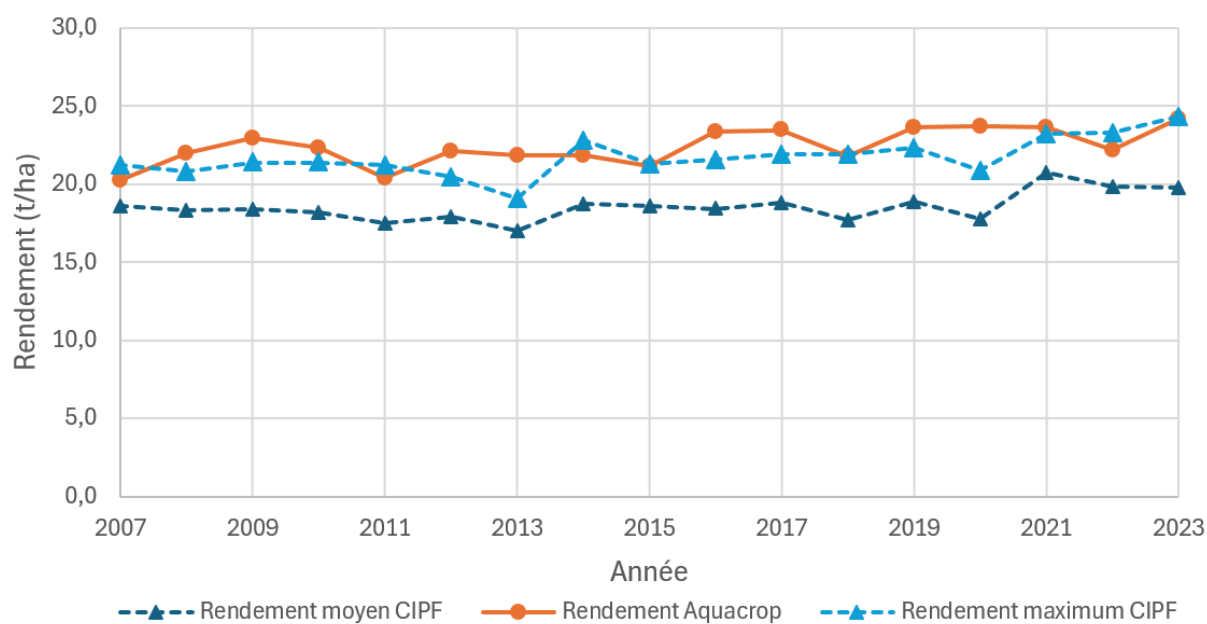


Figure 28 : Comparaison entre les rendements en maïs fourrager simulés par Aquacrop (pour des sols de 1,6 mètre d'épaisseur) et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF pour des sites de la région limoneuse en Wallonie par année (entre 16 et 42 sites en fonction des années).

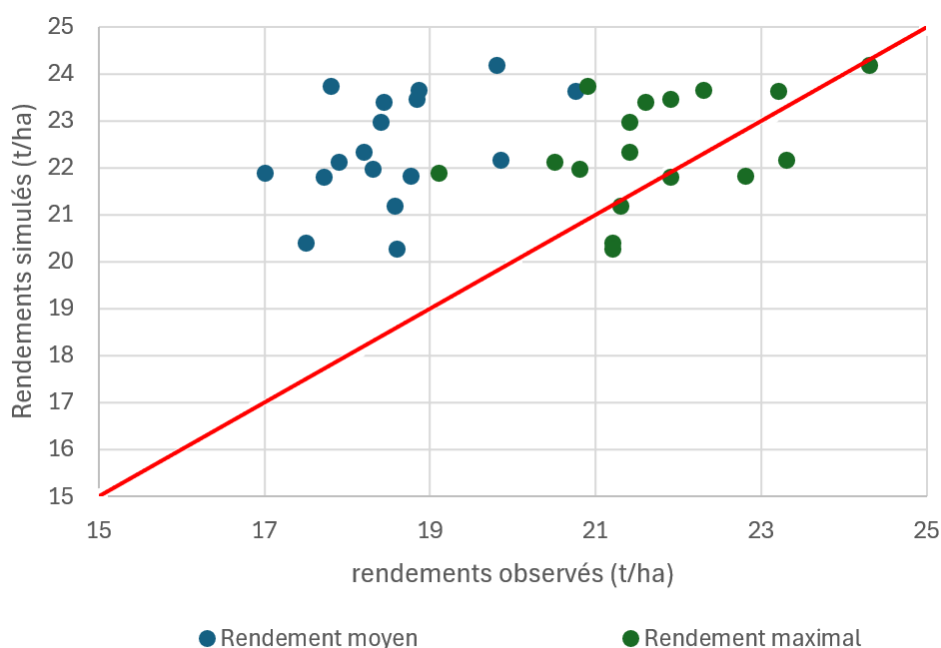


Figure 29 : Comparaison entre les rendements en maïs fourrager simulés par Aquacrop pour des sols d'épaisseur 1,6 mètre et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF pour des sites de la région limoneuse de la Wallonie (entre 16 et 42 en fonction des années) entre 2007 et 2023.

Concernant la pluviométrie, celle-ci ne semble pas avoir d'effet sur le rendement pour la période étudiée, que ce soit pour les simulations ou les observations, pour des sols limoneux (figure 30).

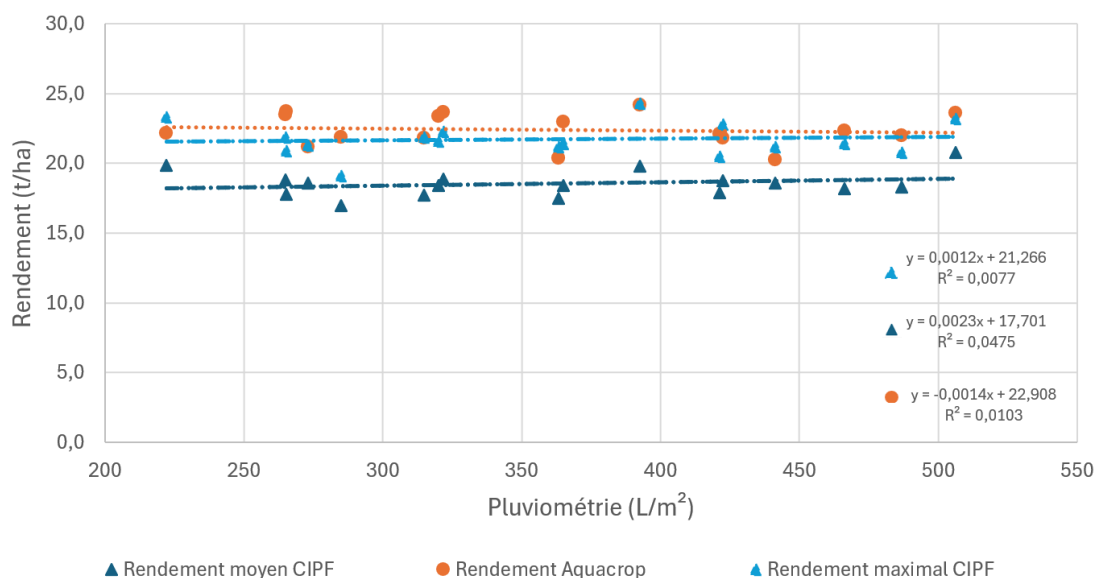


Figure 30 : Comparaison entre les rendements en maïs fourrager simulés par Aquacrop pour des sols de 1,6 mètre d'épaisseur et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF pour des sites de la région limoneuse de la Wallonie (entre 16 et 42 selon les années) en fonction de la pluviométrie entre 2007 et 2023. La pluviométrie est calculée sur toute la période de simulation.

Sur sol sablo-limoneux

Les rendements du CIPF sont tirés de la région sablo-limoneuse en Wallonie et le nombre de sites varie entre 12 et 26, avec une moyenne de 18 sites par année. Cette fois encore, les rendements Aquacrop sont en moyenne plus élevés que les rendements moyens du CIPF (figure 31 et 32) mais la différence est dans ce cas moins importante (2,8 t/ha d'écart en moyenne). Les rendements maximaux observés dans le cadre des essais du CIPF se confondent assez bien avec les rendements Aquacrop.

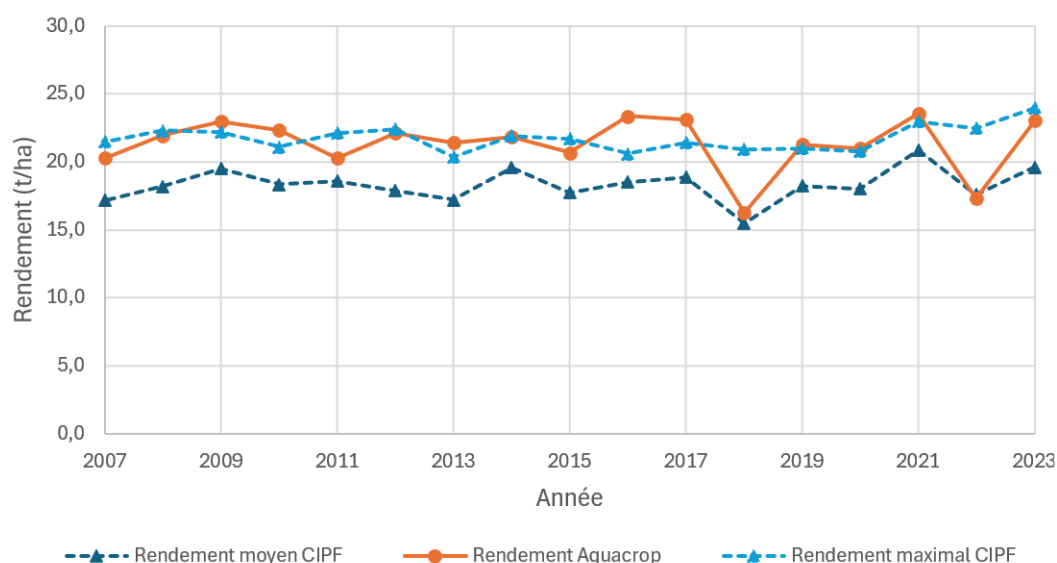


Figure 31 : Comparaison entre les rendements simulés par Aquacrop pour des sols d'épaisseur de 1,6 mètre d'épaisseur et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF pour des sites (entre 12 et 26 en fonction des années) de la région de sablo-limoneuse en Wallonie.

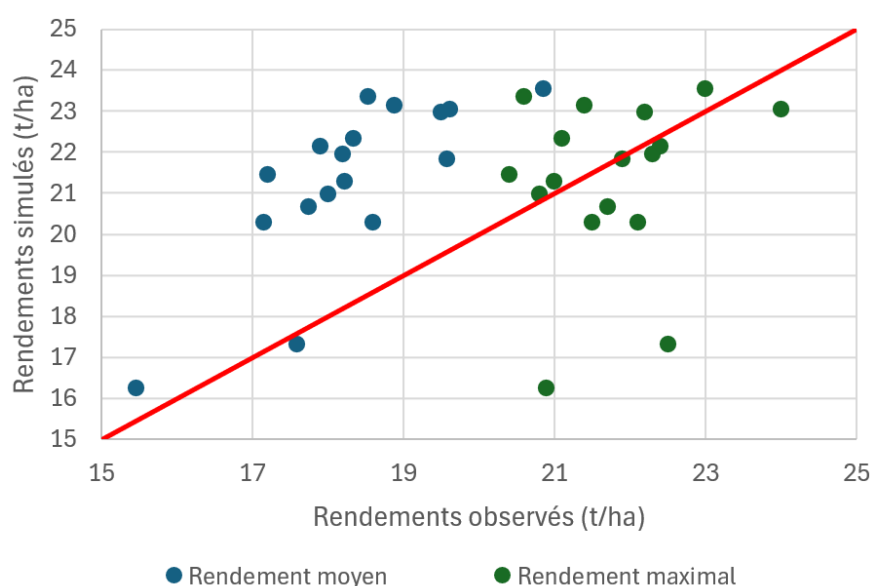


Figure 32 : Comparaison entre les rendements en maïs fourrager simulés par Aquacrop pour des sols d'épaisseur 1,6 mètre et les rendements moyens observés par le CIPF pour des sites de la région limoneuse de la Wallonie (entre 12 et 26 en fonction des années) entre 2007 et 2023.

Les rendements ne semblent pas être impactés par la pluviométrie (figure 33). Les rendements simulés par Aquacrop ont toutefois une légère tendance négative.

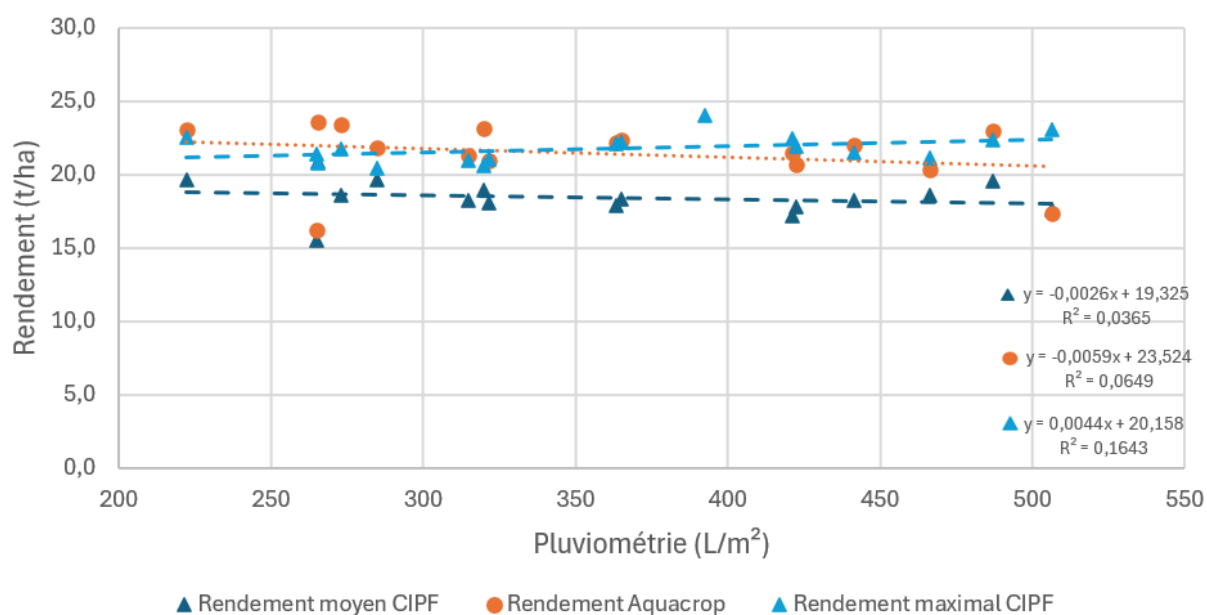


Figure 33 : Comparaison entre les rendements simulés par Aquacrop pour des sols d'épaisseur 1,6 mètre et les rendements moyens et maximaux observés par le CIPF en fonction de la pluviométrie pour des sites de la région de sablo-limoneuse en Wallonie entre 2007 et 2023.

5.1.2 Discussions

Globalement, les similitudes entre les ruissellements observés et simulés suggèrent que les CN calculés sont proches de ceux des sites. Néanmoins, le taux de diminution de ruissellement du rouleau, qui est en moyenne 21% plus élevé pour les essais du CIPF, indique que la diminution du CN pour les simulations a probablement été sous-estimée. L'efficacité du rouleau ne sera donc à priori pas surévaluée, la réalité étant ici plus favorable que la simulation.

En revanche, bien que les résultats de ruissellements pour le rouleau et le témoin soient assez cohérents entre Aquacrop et les observations sur le terrain, les prévisions de rendements fournies par Aquacrop ne correspondent pas aux données obtenues sur le terrain par le CIPF. Ces divergences s'appliquent aussi bien dans la variation interannuelle de rendements entre le rouleau et le témoin qu'entre les rendements moyens observés et simulés. Ces différences doivent toutefois être interprétées avec prudence car les rendements obtenus lors du projet CIPF ne concerne qu'un ou deux sites par année. Il faudrait un nombre plus conséquent de sites pour avoir une tendance plus fiable.

Ces différences peuvent être expliquées par le fait que les sols simulés ont tous les mêmes caractéristiques, là où, chaque site possède des caractéristiques qui diffèrent en réalité. De plus, sur le terrain, les sites sont confrontés à de nombreuses variables externes (par exemple du stress dû à des maladies, des ravageurs, l'activité de l'agriculteur, etc) qui peuvent affecter différemment le rendement même pour des parcelles proches ce qui n'est pas le cas pour les simulations. Enfin, ces essais ayant pour but premier de vérifier dans quelles mesures certaines techniques peuvent limiter l'érosion et le ruissellement, la superficie récoltée reste relativement faible (72 m² par traitement). Ainsi, une petite variation de rendement sur ces bandes peut se traduire par des différences plus importantes à l'hectare.

Les résultats révèlent que les parcelles de maïs ne semblent pas être impactées par la pluviométrie en sols limoneux. Cet impact faible pourrait être expliqué par la bonne rétention en eau des sols limoneux qui permet une bonne résilience face aux conditions plus sèches. En effet, les sols limoneux ont généralement un bon équilibre entre drainage et rétention. La réserve utile des sols limoneux est également importante, 200 mm/m (dans Aquacrop) contre 70 mm/m pour les sols sableux. De plus, le point de flétrissement des sols limoneux est faible (13%) ce qui permet à la plante de prélever de l'eau même lorsque le sol est relativement sec. De plus, il est possible que les années sèches observées en Belgique ne soient pas assez extrêmes pour amener à un stress hydrique sévère pour les cultures des parcelles prélevées.

Les rendements du maïs sur sols sablo-limoneux simulés par Aquacrop diminuent de 6 kg par L/m² de pluie, ce qui peut sembler surprenant. Cependant, il ne faut pas oublier que le rendement ne dépend pas uniquement de la pluviométrie mais également d'autres facteurs tels que la température ou le rayonnement. Il est donc possible que ces variables aient permis un bon rendement en culture de maïs pour les sols sablo-limoneux durant les années sèches tout en n'étant peu avantageuses pendant les années humides.

Cette situation remet partiellement en question les paramètres du fichier de culture et du modèle, notamment sur la réponse du maïs au stress et ses interactions avec la température et le rayonnement, par rapport à la réalité. Enfin, notons que ces rendements sont pour les 17 dernières années et qu'il faudrait élargir les observations et simulations pour avoir une idée plus solide et confirmer les tendances observées.

Dans la suite du travail, des simulations seront également effectuées pour des sols argileux. Aucune comparaison ne peut être faite entre les simulations et des données de terrain car il n'y a pas de rendements obtenus par le CIPF pour des sols argileux, ceux-ci étant moins communs en Wallonie.

5.2 Différence de CN entre le rouleau anti-érosif et le témoin

5.2.1 Résultats

La figure 34 découle de la relation entre stockage maximal et pente pour des micro-dépressions de 6 et 10 centimètres de profondeur déterminées par Bélis (2018). Ces résultats ont deux intérêts. Premièrement, ils déterminent le CN du rouleau et du témoin pour différentes pentes dans le cadre du premier objectif (qui évalue la différence de rendement entre le rouleau et le témoin selon différents scénarios pour un sol limoneux en Wallonie). Deuxièmement, ces résultats offrent un aperçu de la capacité du rouleau à diminuer le CN d'un sol, ce qui est pertinent au regard du deuxième objectif.

Le rouleau anti-érosif permet de diminuer substantiellement le CN par rapport au témoin. La gamme de différence se situe entre 10 et 8 unités CN pour les micro-dépressions de 6 centimètres de profondeur et entre 14 et 12,5 unités CN pour les micro-dépressions de 10 centimètres de profondeur.

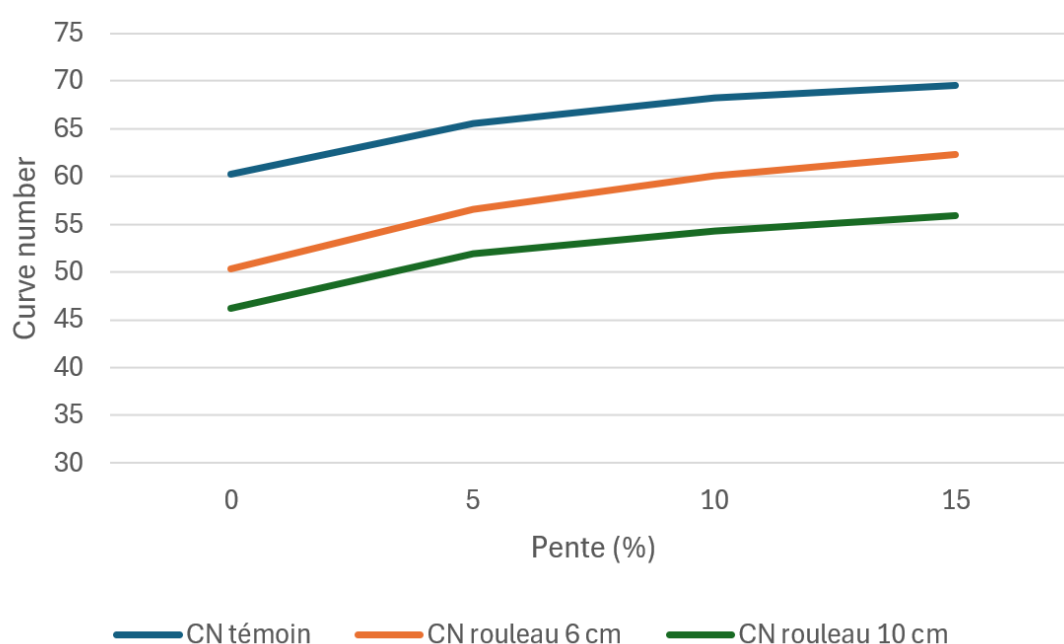


Figure 34 : Curve number pour une culture de maïs en fonction de la pente pour un sol témoin, un sol ayant subi un passage au rouleau anti-érosif « classique » (micro-dépression de 6 cm de profondeur) et un sol ayant subi un passage au rouleau anti-érosif avec des micro-dépressions de 10 cm de profondeur.¹⁷

¹⁷ Ce graphique correspond aux CN associés aux sols de l'étude de Clément et al. (2023) abordé dans le point 4.3.2 et n'aurait probablement pas le même effet pour des CN différents. Les explications du calcul des différents CN se trouvent dans le point 4.2.3 de la méthodologie.

5.2.2 Discussions

La profondeur des dépressions est une variable intéressante dans un objectif d'amélioration de l'efficacité du rouleau anti-érosif. Cet outil étant relativement récent, il pourrait faire l'objet d'une étude visant à améliorer son potentiel. Dans ce contexte, il serait intéressant de vérifier jusqu'à quel point le CN peut diminuer en augmentant la profondeur des micro-dépressions. Il serait également intéressant d'analyser la différence de CN entre le rouleau et le témoin pour d'autres valeurs de CN.

Il est également important de prêter attention à l'efficacité des micro-dépressions sur le long terme, par exemple en vérifiant le remplissage potentiel par des sédiments au cours de la saison. En effet, bien que l'étude de Clément et al. (2023) n'ait pas permis de pointer un effet statistique des conditions environnementales sur l'efficacité des micro-dépressions au cours du temps dans différents sites, celles-ci pourraient avoir une perte d'efficacité le long de la saison malgré tout.

La différence de curve number entre le rouleau et le témoin a tendance à diminuer en fonction de la pente. Un passage au rouleau anti-érosif permet, dans cette étude, de réduire le CN de 17% pour des sols sans pentes et de 12% pour des sols à pente de 10%. Ces résultats s'inscrivent dans l'intervalle des résultats de l'étude de Sittig (2023) qui rapporte, pour différentes études faites sur les micro-dépressions en maïs, des diminutions de CN allant de 3% à 17% avec une moyenne de 7%¹⁸. Les taux de réductions observés avec le cloisonnement des interbuttes en culture de pommes de terre varient entre 6 et 36% (Sittig, 2023). Les chiffres en maïs sont donc inférieurs à ceux en culture de pommes de terre. Les taux de réduction en pomme de terre sont plus importants car les dépressions sont plus profondes et plus larges. Les taux de réduction en maïs restent toutefois notables.

Les différences de CN varient entre 8 et 14 unités; cependant, pour le second sous-objectif, une gamme de différences de CN comprise entre 5 et 20 unités sera considéré afin de prendre en compte la marge d'action du rouleau.

¹⁸ les sites analysés ont une pente moyenne de 11%

5.3 Comparaison rouleau anti-érosif/témoin

Les résultats suivants visent à évaluer les rendements obtenus pour des parcelles témoins et des parcelles traitées au rouleau anti-érosif en années sèches, en Wallonie, pour des sols de différentes pentes et épaisseurs. Les différentes années simulées sont regroupées en 3 catégories, comme expliqué dans le point 4.3.

5.3.1 Résultats

5.3.1.1 Effet de l'épaisseur du sol

En moyenne, les rendements diminuent à mesure que l'épaisseur du sol diminue. Cet effet est cependant beaucoup plus marqué dans les années sèches que dans les années humides (figure 35). Par rapport aux sols les plus fins (0,8 mètre d'épaisseur), les rendements des sols les plus épais (1,6 mètre d'épaisseur) sont en moyenne plus élevés de 5,8 t/ha pour les années sèches et de 0,43 t/ha pour les années humides. Les rendements des sols de 1,6 mètre d'épaisseur sont très proches pour les 3 catégories d'années. Il n'y a pratiquement aucune différence entre les rendements 'témoins' et les rendements 'rouleau'.

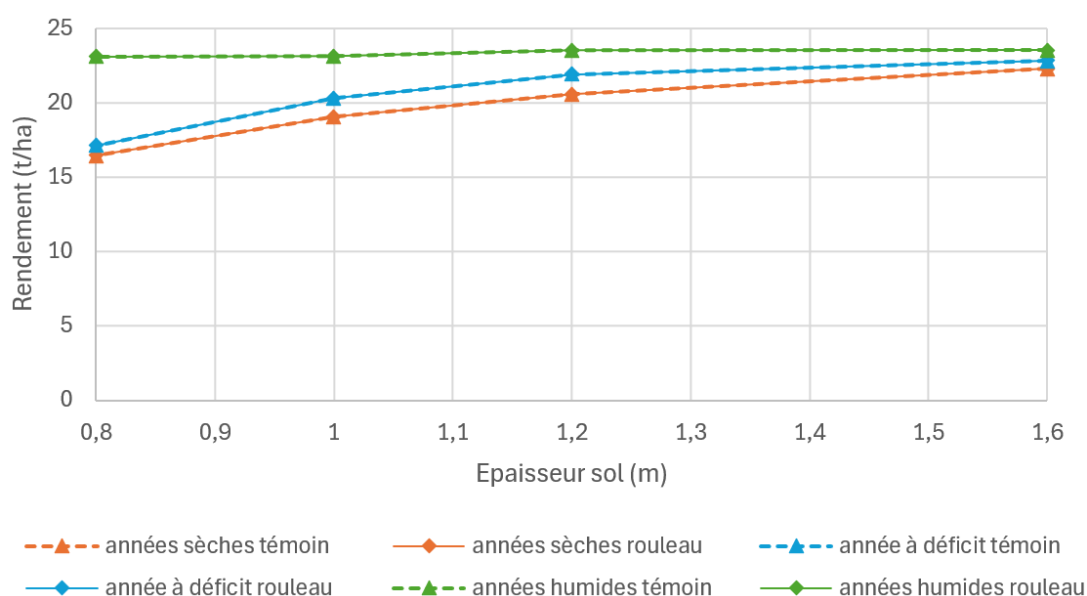


Figure 35 : Comparaison des rendements en biomasse (correspondant au maïs fourrager) pour le rouleau anti-érosif et pour le témoin en fonction de l'épaisseur du sol pour les 3 catégories d'années (années sèches, humides et à déficit hydrique prolongée). Les rendements sont moyennés pour des pentes variant entre 0 et 15%¹⁹.

¹⁹ Chaque point représente la moyenne du ruissellement des années d'une catégorie. Le ruissellement est calculé pour l'ensemble de la saison. Les barres d'erreurs correspondent à l'écart-type dû à la pente, elles ne sont pas visibles car l'effet pente n'influence pratiquement pas les rendements.

La figure 36 indique une différence non négligeable entre le rouleau et le témoin au niveau du ruissellement. L'épaisseur du sol n'a, par contre, aucun effet sur le ruissellement. Les ruissellements pour les années sèches et les années à déficit hydrique prolongé sont très faibles sur l'ensemble de la saison.

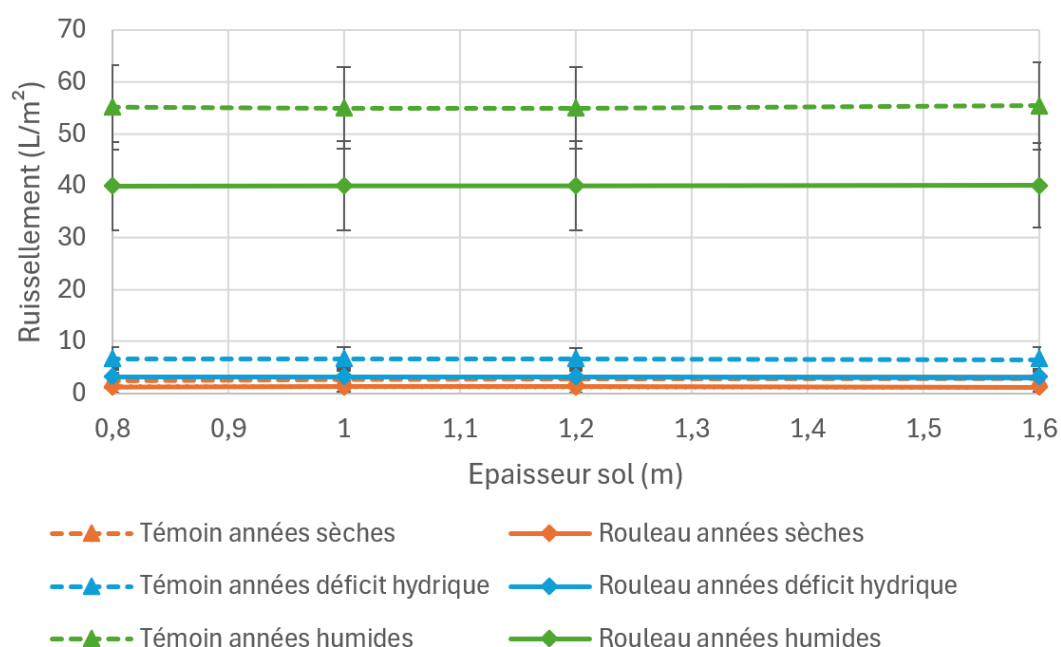


Figure 36 : Comparaison du ruissellement pour le rouleau anti-érosif et pour le témoin en fonction de l'épaisseur du sol pour les différentes catégories d'années (années sèches, humides et à déficit hydrique prolongée). Le ruissellement est moyenné pour des pentes variant entre 0 et 15%.²⁰

5.3.1.2 Effet de la pente

Les rendements du maïs fourrager dans les champs ayant subi un passage au rouleau sont presque identiques à ceux des champs témoins (figure 37). Par ailleurs, la pente n'a pratiquement aucun effet sur les rendements du maïs. Celle-ci a cependant un impact significatif sur le ruissellement, qui est en moyenne deux fois plus élevé pour les sols avec une pente de 15 % que pour les sols plats. Le pourcentage de réduction du ruissellement par le rouleau diminue à mesure que la pente augmente (figure 38).

Bien que la figure 37 semble montrer une différence notable de rendement entre les années sèches 19,6 (t/ha), les années à déficit hydrique prolongé (20,5 t/ha) et les années humides (23,1 t/ha), ces chiffres représentent le rendement moyen pour des sols d'épaisseur variant de 0,8 mètre à 1,6 mètre. Or, les rendements des sols peu épais sont fortement affectés par

²⁰ Chaque point représente la moyenne du ruissellement des années d'une catégorie. Le ruissellement est calculé pour l'ensemble de la saison. Les barres d'erreurs correspondent à l'écart-type dû à la pente.

les années sèches en raison de leur capacité de stockage en eau plus faible, ce qui n'est pas le cas pendant les années humides, entraînant ainsi une diminution significative de la moyenne.

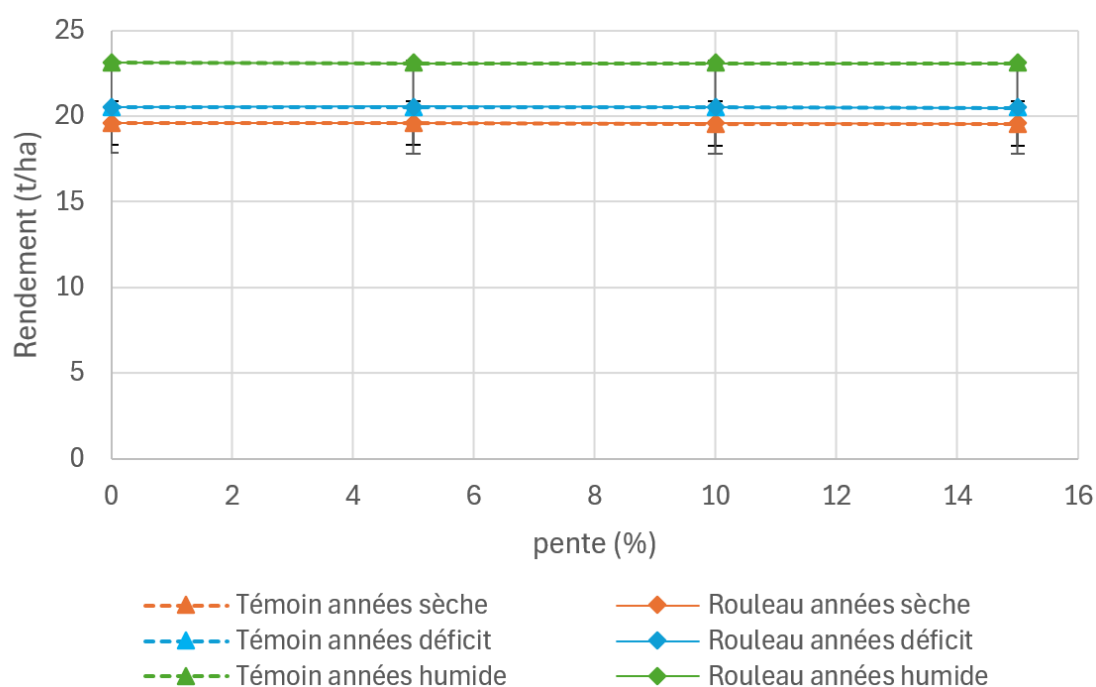


Figure 37 : Moyennes des rendements fourragers pour le rouleau anti-érosif et le témoin en fonction de la pente pour les différentes catégories d'années (années sèches, à déficit hydrique prolongé et humides). Le rendement est moyenné sur des sols d'une épaisseur allant de 1,6 mètre à 0,8 mètre

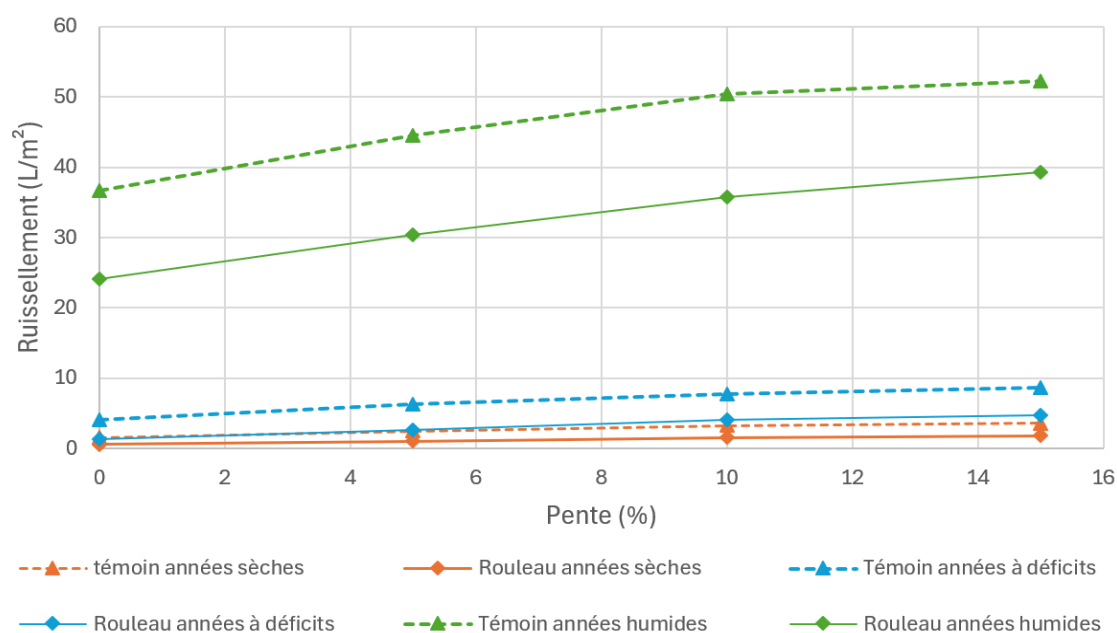


Figure 38 : Moyennes des ruissellements pour le rouleau anti-érosif et le témoin en fonction de la pente pour les différentes catégories d'années (années sèches, à déficit hydriques prolongés et humides). Le ruissellement est moyenné sur des sols d'une épaisseur allant de 1,6 mètre à 0,8 mètre.

5.3.1.3 Relation entre le rendement ou le ruissellement et l'indice de réserve hydrique

Les figures 39 et 40 présentent les rendements et les ruissellements pour les simulations du témoin et du rouleau en fonction de l'indice de réserve hydrique pour les différentes années simulées²¹. Cette fois encore, il n'y pratiquement aucune différence de rendement entre les traitements témoins et les traitements au rouleau anti-érosif. On observe une légère baisse de rendement entre 300 L/m² et -50 L/m², puis une baisse plus significative lorsque l'indice s'approche de -250 L/m² (figure 39). Les sols de 1,2 mètre d'épaisseur et les sols à charges caillouteuses ont systématiquement un indice de réserve hydrique plus faible, de par leur réserve utile plus faible (annexe 8.6).

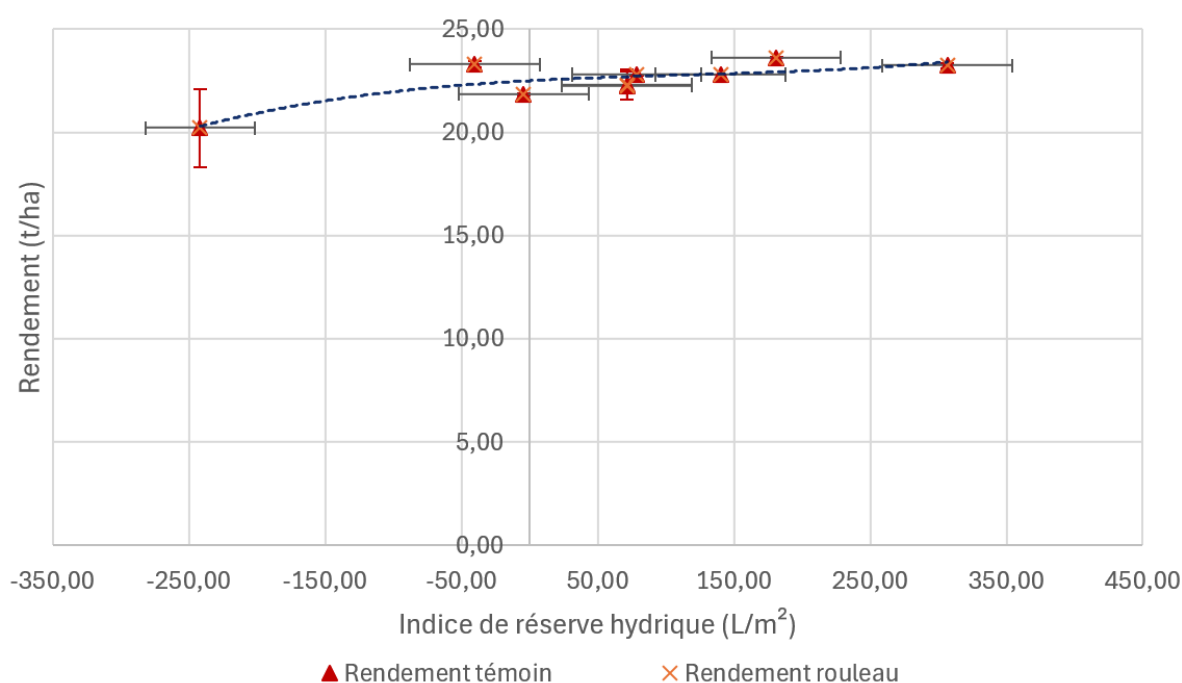
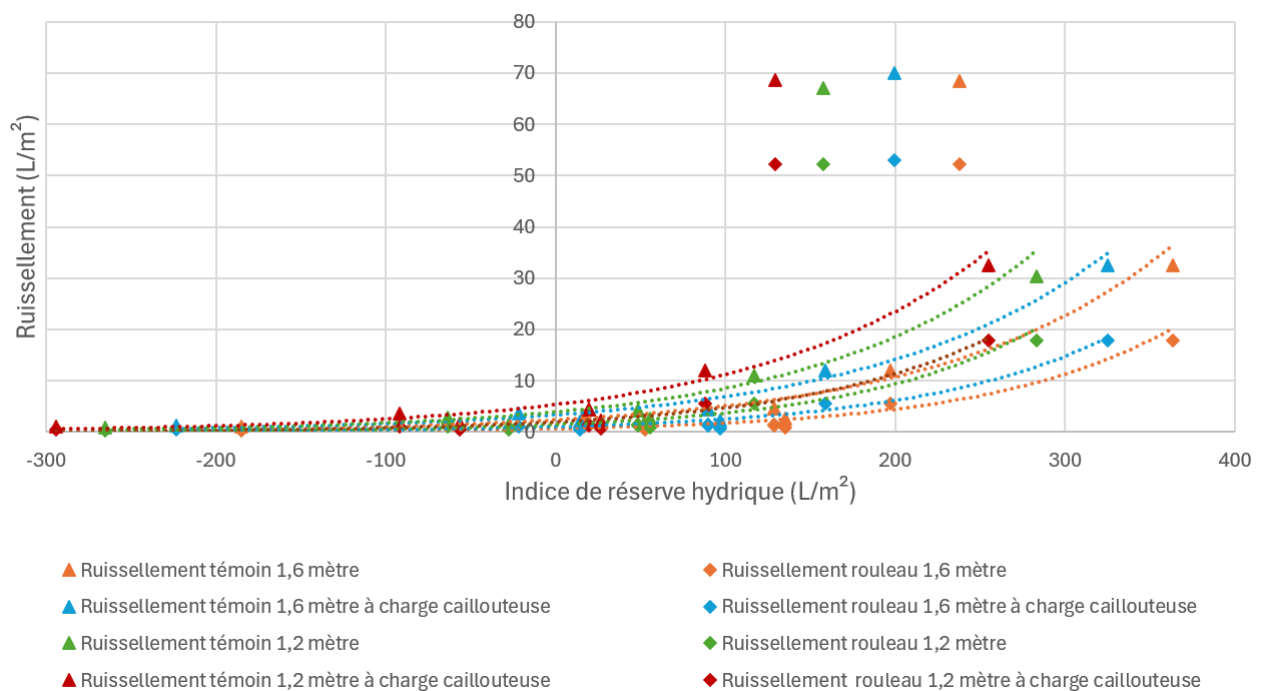


Figure 39 : Rendement du rouleau anti-érosif et du témoin (triangle rouge) et du rouleau (croix orange) en fonction de l'indice de réserve hydrique des 9 années simulés moyennés pour des sols limoneux de 1,6 mètre, 1,2 mètre, 1,6 mètre à charge caillouteuse et 1,2 mètre à charge caillouteuse pour des sols à pente de 10%. Les barres d'erreurs horizontales représentent les écarts-types de l'indice de réserve hydrique pour les différents sols et les barres d'erreurs verticales représentent les écart-types du rendement pour les différents sols.

²¹ Voir point 4.3

La quantité d'eau ruisselée augmente de manière exponentielle quand l'indice de réserve hydrique augmente. Ces exponentielles suivent 2 tendances, elles sont plus élevées pour les sols moins épais et à charge caillouteuse et elles sont plus élevées pour les témoins que pour les champs soumis à un passage au rouleau (figure 40). Les 8 points de valeurs de ruissellement plus élevés correspondent à l'année « la plus humide » (2008). L'indice de réserve hydrique est moins élevé en 2008 comparativement à l'année « humide » (2002) car l'évapotranspiration lors de 2002 est très faible, ce qui entraîne un indice de réserve hydrique relativement élevé par rapport aux autres années.



5.3.2 Discussions

Globalement, aucune différence significative de rendement n'a été observée entre les parcelles traitées avec le rouleau et les parcelles témoins. Cela semble s'expliquer par le fait que durant les années sèches, la quantité d'eau ruisselée des parcelles témoins et des parcelles traitées au rouleau est proche (et faible), ce qui entraîne un impact minimal sur les rendements. Dans les années humides, bien que la différence de ruissellement soit plus marquée sur les parcelles témoins par rapport aux parcelles traitées, les rendements ne sont pas affectés par le rouleau car les cultures ne subissent pas de stress hydrique.

Bien que les réductions du CN observés par le CIPF et les CN simulés par Aquacrop soient proches (5.1), elles ne reflètent pas à elles seules les modifications que l'implantation des micro-dépressions pourrait engendrer. En effet, il faut par exemple considérer le fait que les micro-dépressions créées par le rouleau se trouvent dans les inter-rangs et non directement sous les plants. Par conséquent, il serait pertinent d'analyser l'impact de ces micro-dépressions sur l'absorption de l'eau par les plantes et sur les modifications que cela implique. Par exemple, en année sèche, on pourrait s'attendre à observer une tendance des racines à se diriger vers les zones sous les micro-dépressions, où l'eau est un peu plus abondante.

Notons que les simulations précédentes ont été réalisées pour des CN déterminés par l'étude de Clément et al. (2023) à partir de 209 événements pluvieux sur 14 duos années*sites situés. Ces CN sont donc spécifiques à ces sols mais ils pourraient varier pour d'autres régions de Wallonie. Notons également que les CN calculés ici oscillent entre 50 et 70, alors que les tables de l'USDA, qui fournissent les CN théoriques des différents sols (basés sur leur classe hydrologique et leur occupation), indiquent qu'un sol limoneux occupé par une culture de maïs varie entre 78 et 81.

De plus, comme mentionné précédemment, des différences de CN plus importantes peuvent être observées pour une plus grande capacité de stockage par les dépressions (point 4.2.2) ou par des micro-dépressions plus profondes, entraînant potentiellement des variations de rendements plus intéressantes. Ce point sera examiné plus en détail dans la prochaine section.

5.4 Rendement du maïs en fonction du CN du témoin et du rouleau

Les résultats suivants visent à répondre au deuxième sous-objectif qui consiste à définir dans quels situations le rouleau anti-érosif est intéressant en termes d'augmentation du rendement. Le rouleau est dit « intéressant » si le rendement augmente de minimum 2%²² par rapport au témoin. L'année sèche est représentée par l'année 2022, l'année normale par l'année 2009 et l'année humide par 2008.

5.4.1 Résultats

5.4.1.1 Sols limoneux

Globalement, les rendements varient très peu en fonction du curve number (figure 41). Des variations notables ne s'observent que pour des CN très élevés. De nouveau, les années humides sont peu impactées dans le cas de sols peu épais contrairement aux années plus sèches. La figure 38 permet de déterminer les conditions favorables à l'utilisation du rouleau. En effet, le rouleau ayant pour but de diminuer le CN d'un sol, celui-ci pourrait permettre de limiter la perte de rendement observée pour les CN élevés. On observe par exemple qu'un sol de 1,2 mètre d'épaisseur et à CN de 90 pourrait bénéficier d'un rendement supplémentaire en diminuant le CN en année à déficit hydrique prolongé (figure 41).

Comme attendu, on observe une tendance exponentielle du ruissellement avec l'augmentation du CN (figure 42). De plus, les années sèches et à déficit hydrique prolongé ont des ruissellements largement inférieurs aux années plus humides. Cependant, les quantités d'eau ruisselées sur la totalité de la saison deviennent relativement importantes en année sèche et à déficit hydrique prolongé dans le cas où le sol possède un CN très élevé.

²² Ce pourcentage a été choisi arbitrairement

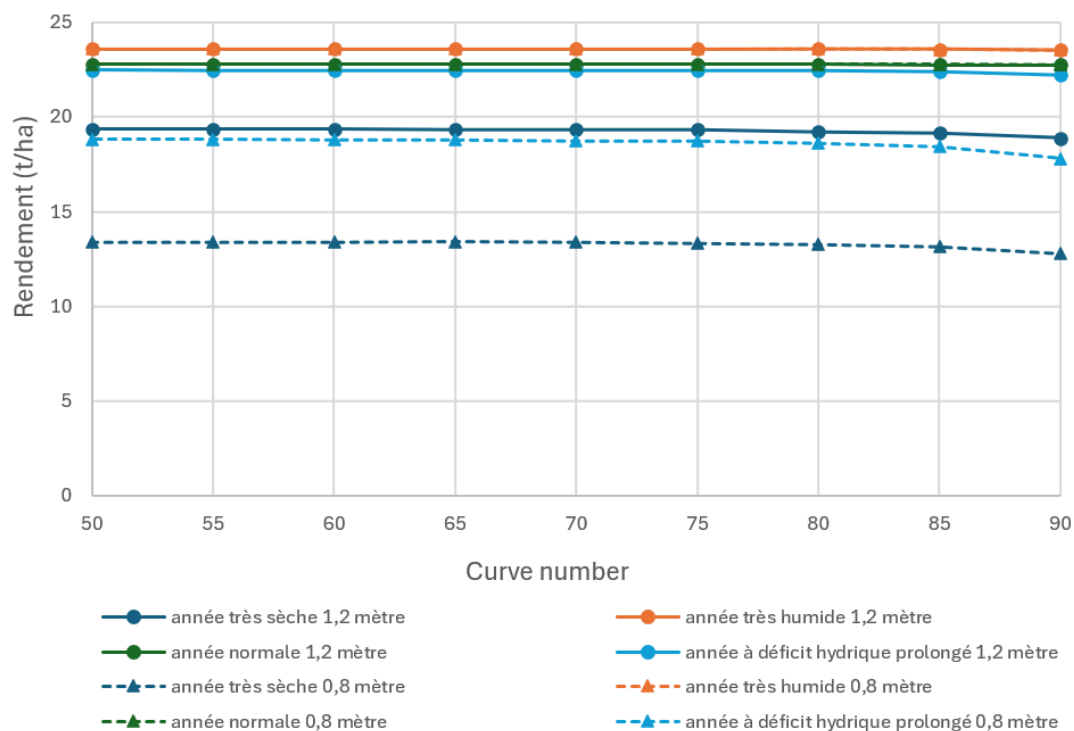


Figure 41 : Rendement en fonction du curve number pour différentes années simulées pour des sols limoneux de 1,2 mètre (traits pleins) et 0,8 mètre (traits pointillés) d'épaisseur.²³

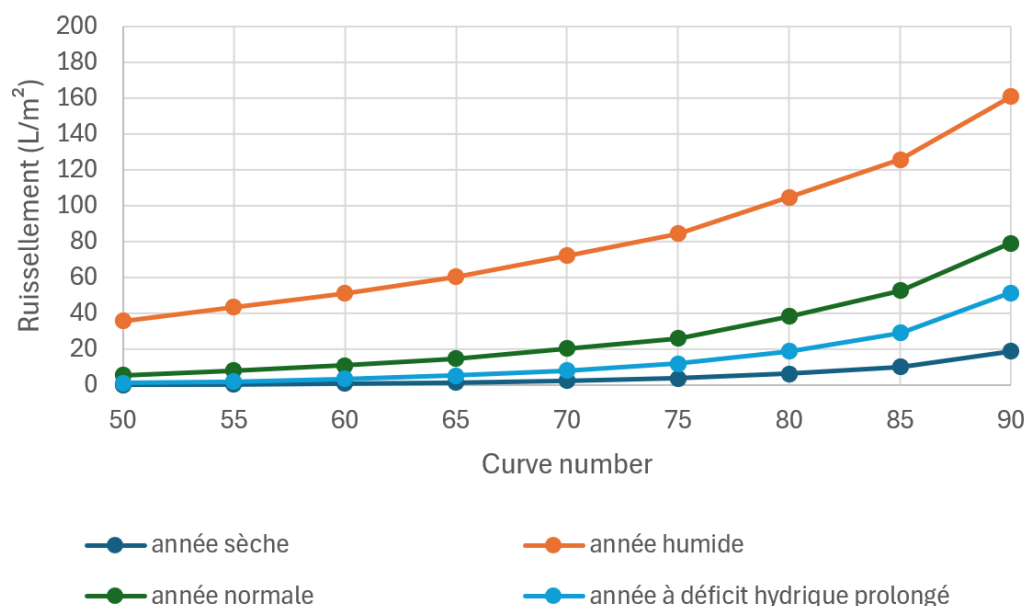


Figure 42 : Ruissellement en fonction du curve number pour différents scénarios simulés sur sols limoneux. Les ruissellements des différents scénarios sont les moyennes pour chaque année des sols simulés de 1,2 et 0,8 m d'épaisseur avec et sans charge caillouteuse. Les ruissellements étant très proches pour les différents sols, les barres d'erreurs (écart-types) ne sont pas visibles sur le graphique.

²³ Les 3 années à déficits hydriques prolongés (40 jours sans précipitations à partir du 3 juin, du 13 juillet et du 21 août) sont fort similaires et ont donc été rassemblées selon leurs moyennes afin de ne pas surcharger les figures 41 et 42.

A) Année sèche

La figure 43 représente le pourcentage supplémentaire de rendement que pourrait apporter le rouleau par rapport à un sol sans traitement pour différentes situations. Pour rappel, un même type de sol peut avoir des CN différents selon ses conditions hydrologiques, sa pente ou les pratiques agricoles qu'il subit (voir 4.2.1). Afin de refléter cette variabilité, plusieurs CN témoins potentiels sont représentés par différentes couleurs : 90, 85, 80, 75, 70, et 65.

Le CN 'rouleau' situé sur l'axe des abscisses représente le CN du sol après un passage du rouleau. Pour chaque CN témoin, une gamme de CN 'rouleau' est déterminée, variant entre 5 et 20 unités de moins que le CN témoin. L'axe des ordonnées correspond au pourcentage de rendement supplémentaire donné par le rouleau par rapport au témoin.

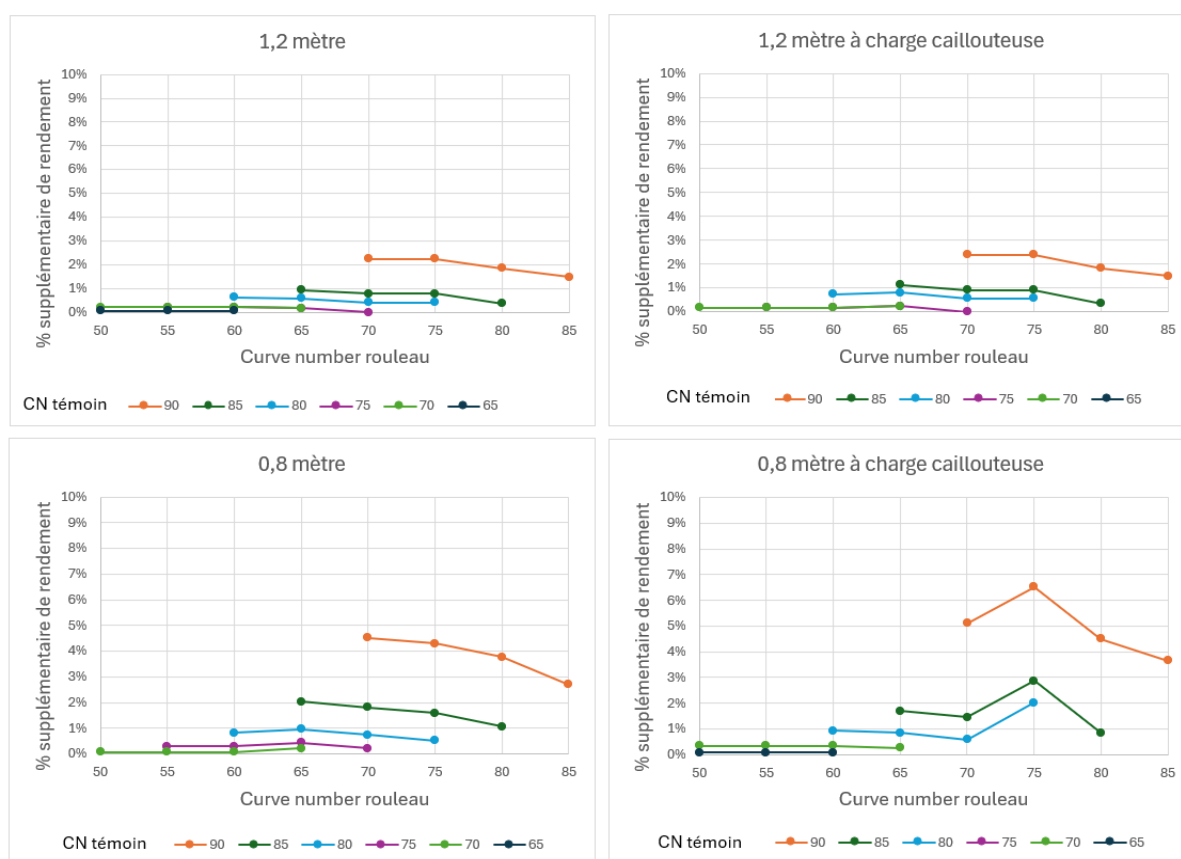


Figure 43²⁴ : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number du sol obtenu après le passage du rouleau pour différentes valeurs de curve number initial (témoin) représentées par les différentes couleurs. Ces graphiques illustrent le pourcentage supplémentaire de rendement obtenu pour une année sèche (2022) sur sol limoneux pour des sols d'épaisseur de 1,2 mètre et de 0,8 mètre avec ou sans charge caillouteuse

²⁴ Exemple d'aide à la compréhension : dans le cas d'un sol de 1,2 mètre d'épaisseur à CN « témoin » de 90 (courbe orange), si le passage au rouleau permet de diminuer le CN du sol jusque 75 alors le rendement supplémentaire obtenu grâce au rouleau est de 2,2%.

Pour les années considérées comme exceptionnellement sèches en Wallonie, le rouleau peut s'avérer intéressant pour les sols où le CN est très élevé (égal à 90 et dans certains cas égal à 85) (figure 40). Cette augmentation est plus élevée pour les sols de 0,8 mètre d'épaisseur et pour les sols à charge caillouteuse.²⁵

B) Années à déficit hydrique prolongé

Les rendements fourragers des trois années à déficit hydrique sont proches, quelques soient les valeurs du CN, pour des sols de 1,2 mètre d'épaisseur (figure 44). Pour les sols de 0,8 mètre d'épaisseur cependant, les rendements varient entre les années. L'année à déficit hydrique prolongé 3 (tardive dans la saison) est moins affectée (perte de 1,5t/ha) par rapport aux autres années à déficit hydrique prolongé 1 et 2 (perte moyenne de 5 t/ha) lorsque le sol passe de 1,2 à 0,8 mètre d'épaisseur. Ceci est dû au fait que le stress hydrique survient lorsque le maïs est en sénescence, contrairement aux autres années où le stress survient pendant des phases critiques de croissance et de mobilisation des ressources

Le rouleau a un impact similaire sur le rendement pour les 3 années (figure 45). Le rouleau s'avère (parfois très) avantageux pour les sols ayant un CN de 90 et dans certains cas pour des sols ayant un CN de 85. Toutefois, le rouleau est légèrement moins intéressant pour l'année à déficit hydrique prolongé 3. Les graphiques correspondant aux pourcentages de rendements supplémentaires pour les sols à charge caillouteuse sont donnés en annexe (8.8).

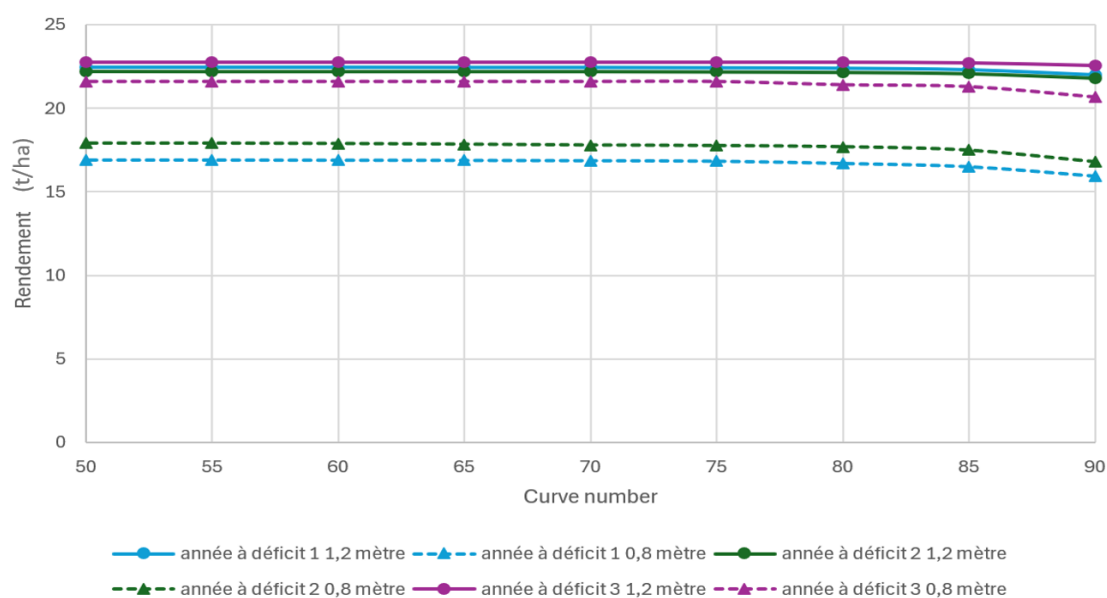
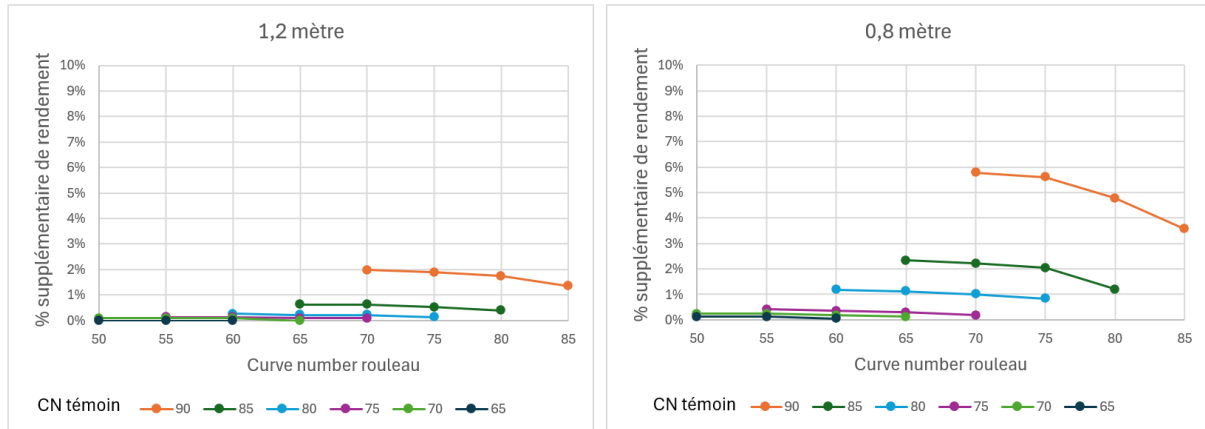


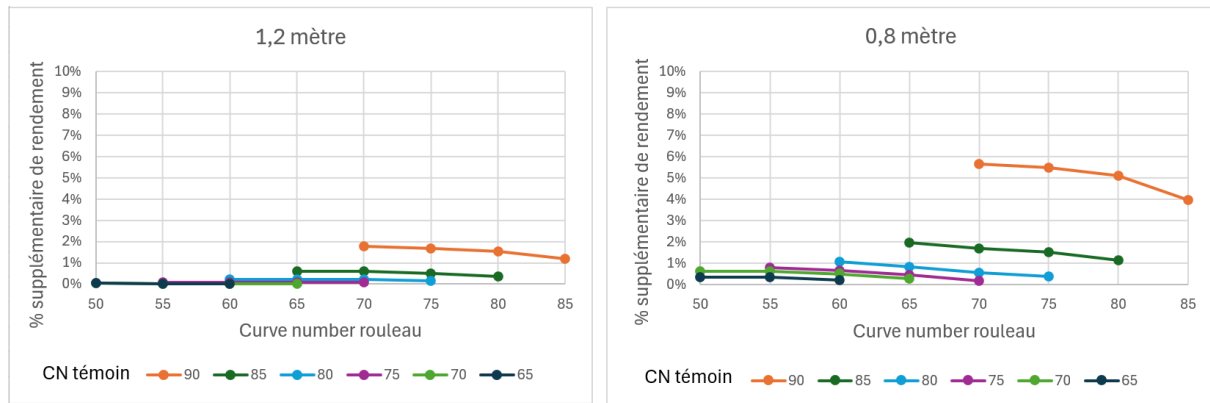
Figure 44 : Rendement en maïs fourrager pour 3 années à déficits hydriques prolongés (40, 80 et 120 jours après le semis) en fonction du curve number pour des sols limoneux. Chaque année est simulée pour des sols de 1,2 et 0,8 mètre de profondeur.

²⁵ Le « pic » d'augmentation du rendement pour un CN égal à 75 dans le cas d'un sol de 0,8 mètre d'épaisseur et à charge caillouteuse est dû à un résultat légèrement surprenant d'Aquacrop qui donne un rendement significativement supérieur par rapport aux autres CN.

Année à déficit hydrique prolongé 1



Année à déficit hydrique prolongé 2



Année à déficit hydrique prolongé 3

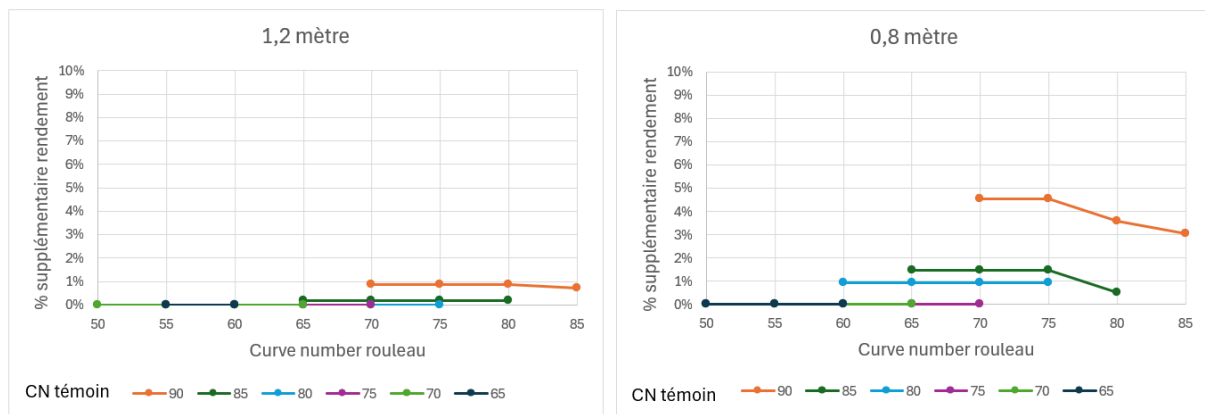


Figure 45 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number des parcelles traitées au rouleau anti-érosif et pour différentes valeurs du curve number des parcelles témoins pour les 3 années à déficit hydrique prolongé (40, 80 et 120 jours après le semis) sur sol limoneux pour des sols d'épaisseur de 1,2 mètre, de 0,8 mètre.

C) Années normales et humides en sol limoneux

Les rendements n'étant pas impactés par le CN dans le cas où les pluviométries sont normales et élevées, le rouleau n'est pas intéressant en termes d'amélioration du rendement pour ces années. Les résultats se trouvent en annexe 8.9.

5.4.1.2 Sols sablo-limoneux

Les rendements ne sont pas impactés par le curve number pour les sols sablo-limoneux (figure 46), le rouleau n'a donc pas aucune utilité pour ceux-ci. Le ruissellement est en fonction du CN est disponible en annexe (8.10).

Pour rappel, les épaisseurs des sols sablo-limoneux et argileux simulés sont plus élevés que ceux des sols limoneux car les rendements pour des sols de 0,8 mètre sont trop peu intéressants d'un point économique. De plus, les CN maximaux des sols sablo-limoneux ont été plafonnés à 80 en raison de leur capacité d'infiltration plus élevée.

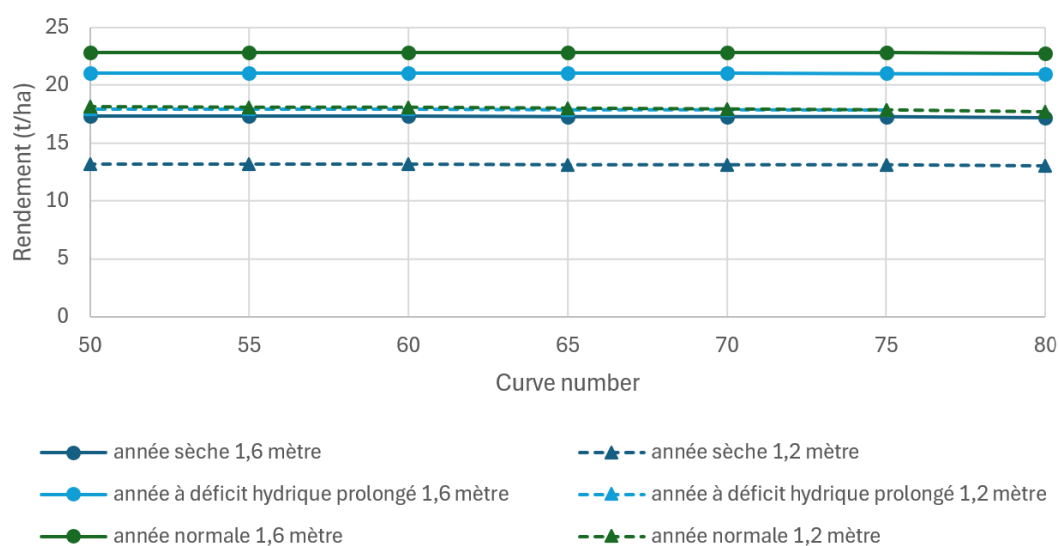


Figure 46 : Rendement en fonction du curve number pour les sols sablo-limoneux pour les trois catégories d'années simulées (année sèche, à déficit hydrique prolongé et humide) et deux épaisseurs de sol (1,6 et 1,2 mètre).

5.4.1.3 Sols argileux

Comme pour les sols limoneux, les sols argileux n'ont d'impacts sur les rendements que pour des CN très élevés (figure 47). le fait d'avoir un sol à CN très élevé est cependant plus probable pour les sols argileux en raison de leur faible capacité d'infiltration. La tendance des ruissellements en fonction de la valeur du CN suit encore une exponentielle (figure 48).

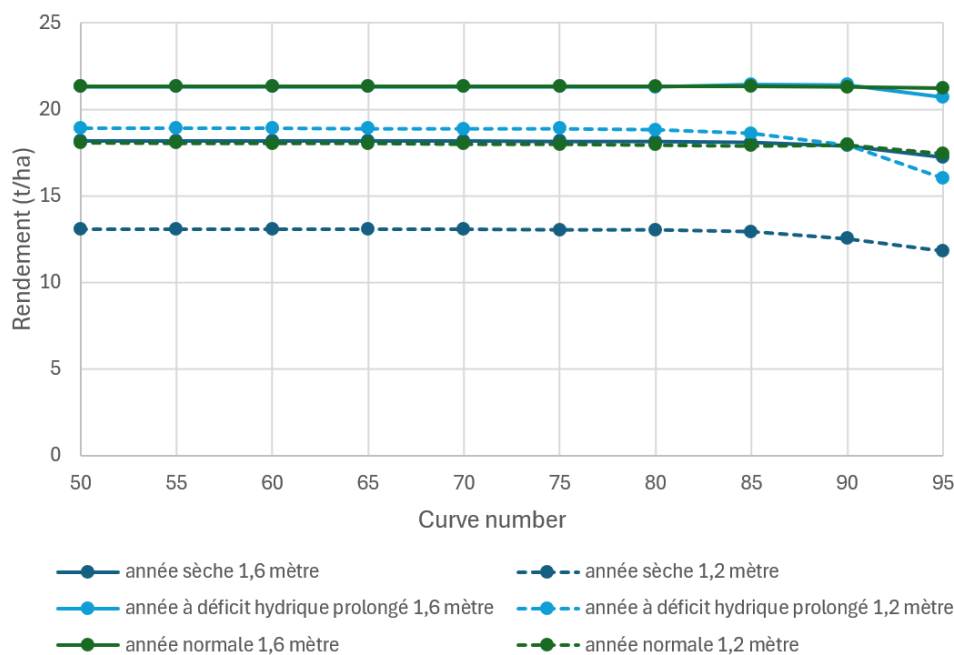


Figure 47 : rendements en fonction du curve number pour les sols argileux pour 3 années simulées (année sèche, à déficit hydrique prolongé et humide) et 2 épaisseurs (1,6 et 1,2 mètre).

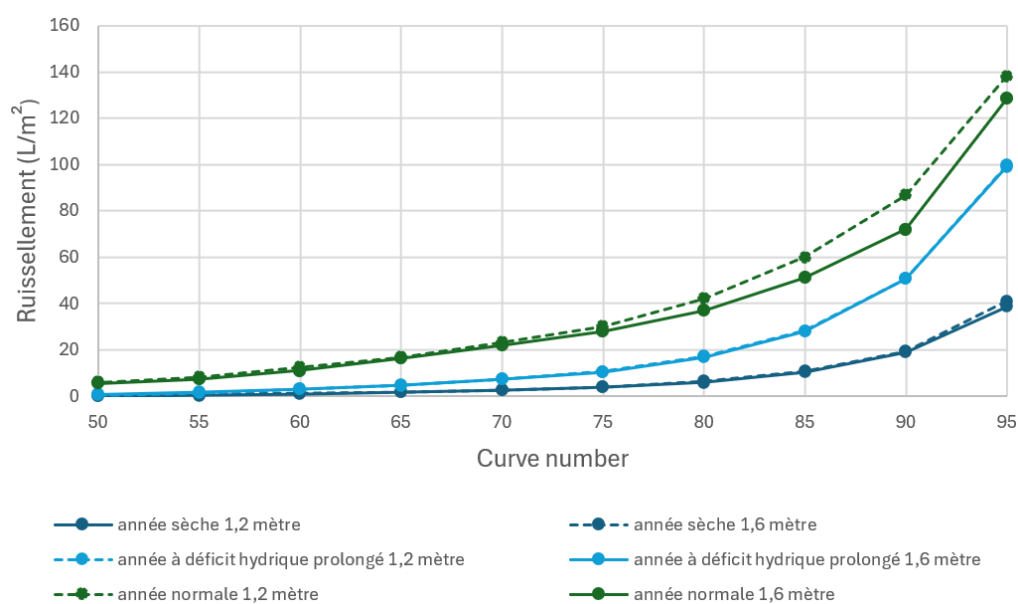


Figure 48 : ruissellement en fonction de la valeur du curve number pour les sols argileux pour les 3 catégories d'années simulées (année sèche, à déficit hydrique prolongé et humide) et 2 épaisseurs de sol (1,6 et 1,2 mètre).

Le rouleau est intéressant dans le cas d'année sèche et à déficit hydrique prolongé en sols argileux, principalement pour des sols à CN élevés (85 et 90) et à épaisseur faible (figures 49, 50 et 51).

Année sèche

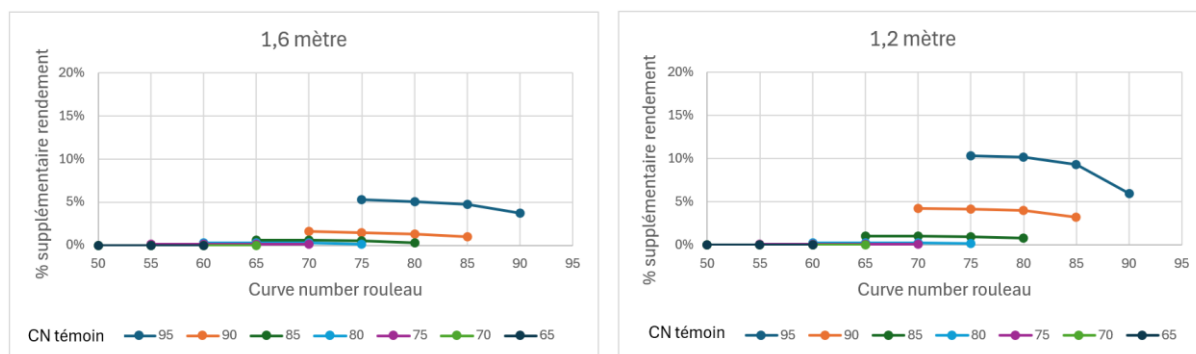


Figure 49 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du CN pour une année sèche sur sol argileux.

Année à déficit hydrique

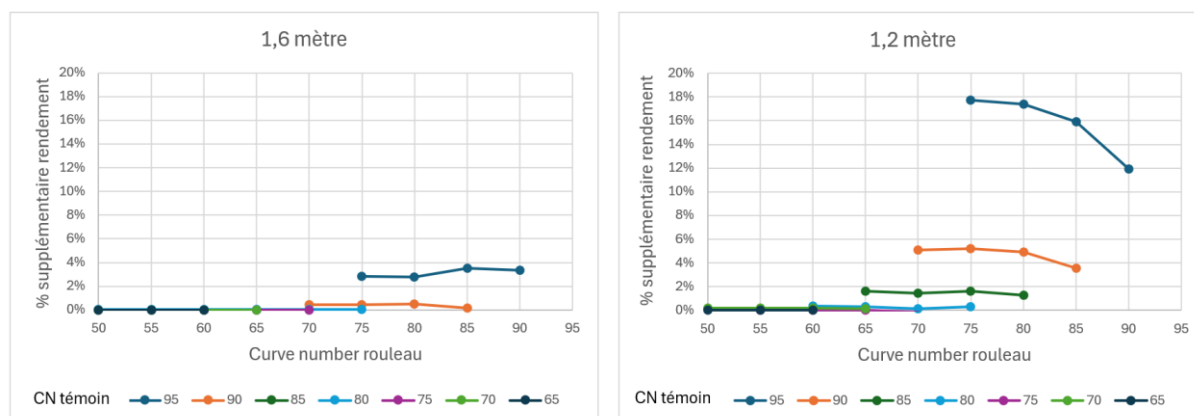


Figure 50 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du CN pour une année à déficit hydrique prolongé sur sol argileux.

Année normale

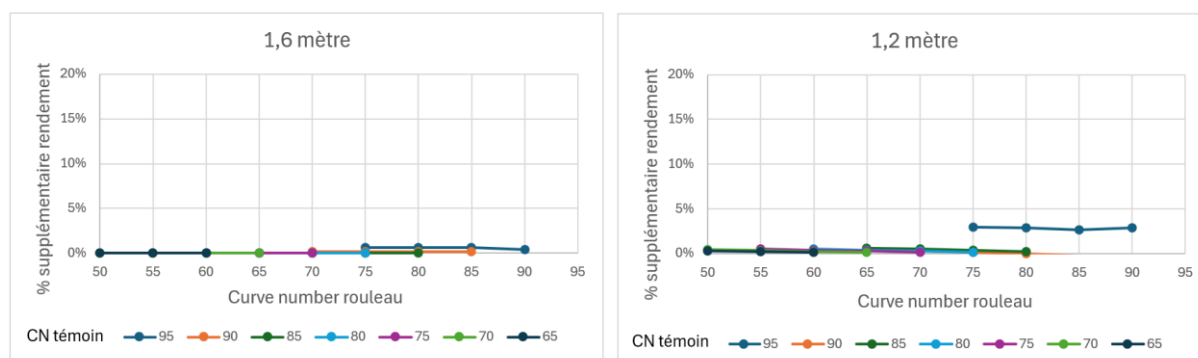


Figure 51 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du CN pour une année normale sur sol argileux.

5.4.2 Discussions

Les résultats révèlent qu'il y a peu de cas où le rouleau est intéressant en termes d'amélioration du rendement du maïs. Les situations où il s'avère bénéfique concernent principalement des sols à CN compris entre 85 et 95. Dans ce cas, les sols subissent des pertes de rendement dues au stress hydrique pendant les années sèches, car une quantité importante d'eau ruisselle. Le rouleau permet de mitiger en partie ce ruissellement, augmentant ainsi la quantité d'eau disponible pour la plante et atténuant par conséquent les pertes de rendement.

Les pourcentages de rendement supplémentaires augmentent lorsque l'épaisseur du sol diminue, passant de 1,6 à 1,2 mètre d'épaisseur pour les sols argileux et de 1,2 à 0,8 mètre pour les sols limoneux. Ces sols disposent de moins d'eau disponible pour la plante et sont plus susceptibles de subir un stress hydrique plus sévère. Le rouleau devient particulièrement bénéfique pour ces sols soumis à des conditions plus sévères.

Cependant, la majorité des sols limoneux en culture de maïs ayant des CN inférieurs à 85, l'intérêt du rouleau reste limité en Wallonie. Le rouleau est plus intéressant pour les sols argileux, qui ont généralement des CN élevés en raison de leur faible capacité d'infiltration. En Wallonie, les sols argileux ne constituent toutefois, environ, que 10% de la superficie totale.

En convertissant le rendement supplémentaire permis par le rouleau (tableau 3 et 4) dans ces scénarios²⁶, en revenus potentiellement gagnés par l'agriculteur, on se rend compte que le gain économique engendré par le rouleau reste très majoritairement marginal. Pour les sols argileux, on observe bien un gain supplémentaire de 418€/ha et 180€/ha pour deux scénarios mais aucun scénario ne permet de fournir un gain supplémentaire de plus de 100€/ha pour les sols limoneux. Il faut enlever à cela le coût du traitement du rouleau (dont les chiffres n'ont pas été communiqués ici). Le rouleau n'est donc pas intéressant en termes économiques bien qu'il puisse permettre d'augmenter le rendement en années sèches.

Ces chiffres sont cependant à contraster avec ceux observés par le CIPF, qui a enregistré, grâce au rouleau, une hausse de la production de 0,8 t/ha en 2013 et de 1,8t/ha en 2017. Ces gains de rendements correspondent, respectivement, à une valeur ajoutée de 120€/ha et 270€/ha pour des sols limoneux à CN inférieur à 70. De plus, le rouleau présente d'autres impacts positifs grâce à la mitigation d'érosion et de ruissellement qu'il engendre. En effet, il limite la perte de fertilité des sols et réduit considérablement la perte de pesticides dans les cours d'eau et les nappes phréatiques (Clément et al., 2023).

²⁶ La différence de CN considéré entre le rouleau et le témoin est de 15 unités (qui correspond approximativement à des micro-dépressions de 10 centimètres de profondeur pour des sols plats). Le prix par tonne (de matière sèche) est basé sur le cours du maïs fourrager en Nouvelle-Aquitaine en 2023 (Chambre d'agriculture C-M, 2023) et vaut 150 €/t:

Tableau 3 : Revenus supplémentaires par hectare générés par l'utilisation du rouleau pour les scénarios dits « intéressants » en sol limoneux²⁷.

Année	Année sèche				Année à déficit hydrique prolongé			
Type de sol	Sol 1,2m CN témoin 90	Sol 1,2m CN témoin 85	Sol 0,8m CN témoin 90	Sol 0,8m CN témoin 85	Sol 1,2m CN témoin 90	Sol 1,2m CN témoin 85	Sol 0,8m CN témoin 90	Sol 0,8m CN témoin 85
Rendement supplémentaire (t/ha)	0,43	0,18	0,59	0,27	0,14	0,14	0,37	0,19
Revenu supplémentaire €/ha	64,5	27	88,5	40,5	21	21	55,5	28,5

Tableau 4 : Revenus supplémentaires par hectare générés par l'utilisation du rouleau pour les scénarios dits « intéressants » en sol argileux

Année	Année sèche				Année à déficit hydrique prolongé		
Type de sol	Sol 1,6m CN témoin 90	Sol 1,6m CN témoin 85	Sol 1,2m CN témoin 90	Sol 1,2m CN témoin 85	Sol 1,6m CN témoin 90	Sol 1,2m CN témoin 90	Sol 1,2m CN témoin 85
Rendement supplémentaire (t/ha)	0,88	0,27	1,2	0,52	0,58	2,79	0,94
Revenu supplémentaire (€/ha)	132	40,5	180	78	87	418,5	141

²⁷ Les 2 années intéressantes concernent l'année 2022 (la plus sèche depuis 1999) et la moyenne des années à déficit hydrique prolongé. La diminution du CN considéré par le rouleau est de 15 unités.

5.5 Discussions générales

Comme on pouvait s'y attendre, le rouleau a un impact significatif sur la mitigation du ruissellement. Cette réduction est notable pour toutes les années et s'accroît avec l'effet pente. Cependant, même si le pourcentage de diminution du ruissellement en année sèche est intéressant, les quantités de ruissellement restent très faibles pour des courbes de nombres spécifiques au Brabant Wallon durant ces années à faible pluviométrie. Cette diminution assez faible du ruissellement n'apporte par conséquent que très peu de rendement supplémentaire car la quantité d'eau disponible pour les plantes reste pratiquement inchangée. Il est également intéressant de noter que le CIPF a observé des rendements moyens en maïs fourrager assez élevés pour les sols de la région limoneuse même lors d'années où la pluviométrie est déficitaire, bien que le maïs soit sensible à la sécheresse. Cette observation suggère un développement limité du stress hydrique pour les cultures sur ces sols, probablement en raison de leur bonne rétention en eau.

Par ailleurs, en simulant ces cultures avec des sols à courbes de nombres plus élevées (entraînant un ruissellement accru), on constate que le rouleau atténue la perte de rendement due au stress hydrique pendant les années sèches. L'efficacité du rouleau est particulièrement notable sur les sols peu profonds et caillouteux. La quantité d'eau stockée et la capacité de rétention d'eau étant réduite due aux cailloux, la quantité supplémentaire d'eau infiltrée par le rouleau diminue plus significativement le stress hydrique subi par la plante. Ces courbes de nombres élevées peuvent résulter de pratiques agricoles inadaptées (en plus des facteurs évoqués précédemment tel que le type de sol ou la pente). En effet, les pratiques agricoles tel qu'un travail excessif, des passages répétés d'engins agricoles ou des pratiques limitant l'activité biologique peuvent impacter la structure du sol et sa capacité d'infiltration sur le long terme. Cette déstructuration du sol peut engendrer un impact sur la quantité d'eau retenue dans le sol et donc induire plus facilement un stress hydrique.

Les gains de rendements obtenus par le rouleau sont moins importants que d'autres cultures et techniques de collecte d'eau en région aride et semi-aride. Effectivement, il n'est pas rare d'observer des taux de rendements supplémentaires de plusieurs dizaines de pourcents pour des techniques tels que le *zaï* ou le *tie-ridging* (Clavel et al., 2009; Gerard et al., 1984; Gnoumou et al., 2017), là où le rouleau plafonne à dix pourcents supplémentaire dans cette étude.

En ce qui concerne le modèle de simulation, celui-ci représente assez fidèlement la diminution du ruissellement due au rouleau quand on compare les observations lors des essais du CIPF avec des simulations pour des conditions similaires. Il présente malgré tout quelques limitations comme l'impossibilité de modéliser fidèlement les micro-dépressions en jouant sur la surface du sol. De plus, l'étude menée ici repose sur des conditions considérées comme « idéale » pour simplifier la représentation de la réalité, ce qui inclut un sol uniforme et exempt

de stress. Pour obtenir des résultats plus proches de la réalité, il serait par exemple pertinent de tester des scénarios avec une première couche de sol limoneuse et une seconde couche sableuse afin de vérifier si un stress hydrique se développe plus facilement. Il existe également d'autres types de modèles, tels que DSSAT ou APSIM, avec une représentation plus poussée de la plante et du sol, mais qui demandent une paramétrisation plus poussée aussi. Le choix d'Aquacrop représente un compromis entre réalisme et complexité.

Enfin, il serait intéressant de simuler d'autres scénarios afin d'approfondir les situations où le rouleau peut être avantageux. Par exemple, dans la situation où de fortes précipitations précèdent des périodes de déficit hydrique importantes. Dans ce cas, il serait attendu que les sols « témoins » atteignent rapidement leur saturation et que les sols traités accumulent de l'eau dans les micro-dépressions, permettant une infiltration progressive sur plusieurs jours. L'implantation de micro-dépressions permettrait dans ce cas de répondre au but premier des techniques de collecte d'eau de ruissellement qui consiste à stocker l'eau quand celle-ci est abondante afin de la rendre disponible pour la plante lors qu'elle est manquante.

Par ailleurs, comme expliqué dans le début de cette étude, les épisodes de sécheresse devraient s'aggraver dans le futur. Dans ce contexte, il serait intéressant de simuler des scénarios de futurs épisodes extrêmes en Wallonie. Enfin, il serait intéressant de tester ce rouleau sur d'autres régions cultivatrices de maïs à risque de sécheresse comme certaines régions du sud de la France par exemple.

6. Conclusion et perspectives

Les résultats ont permis de démontrer que l'utilisation du rouleau anti-érosif n'apporte que peu de bénéfices sur le rendement du maïs des sols limoneux caractéristiques du nord de la Wallonie durant les années sèches. En effet, ces sols ont une bonne capacité de rétention, ce qui empêche le développement d'un stress hydrique sévère. La sécheresse reste météorologique sans se transformer en sécheresse agricole.

Cependant, pour les sols wallons à très faible capacité d'infiltration, ainsi que pour les sols à faible épaisseur ou à teneur élevée en cailloux (ayant par conséquent un stock d'eau plus limité), un stress hydrique se développe en année sèche. Dans ce cas, l'implantation de micro-dépressions par le rouleau pourrait favoriser l'infiltration progressive de l'eau, réduisant ainsi le stress hydrique et les pertes de rendements. Ce gain supplémentaire n'apporte toutefois qu'une faible valeur ajoutée pour l'agriculteur. Il est également possible d'améliorer le rouleau en augmentant la profondeur de ses micro-dépressions et donc leur capacité de stockage.

L'utilisation de l'outil Aquacrop s'est avérée être pertinente pour cette étude en raison de sa capacité à estimer de manière précise la mitigation du ruissellement, similaire aux quantités observées sur le terrain par le CIPF suite à l'application du rouleau anti-érosif. Cet outil a toutefois présenté quelques limitations notamment dues à des simplifications dans la représentation de la réalité.

Enfin, bien que les précipitations restent suffisantes en Belgique pour maintenir des rendements stables sur une bonne partie des sols, même durant les années sèches, les sécheresses sont prévues pour devenir plus intenses et fréquentes dans le futur. Dans ce contexte, il serait pertinent de simuler de futurs épisodes de sécheresse extrême et d'évaluer le rôle du rouleau dans cette situation. Ce rouleau pourrait également être intéressant dans des régions plus exposées aux sécheresses, comme le sud de la France. Les résultats de cette étude ouvrent la voie à de nouvelles recherches et à l'optimisation des pratiques agricoles pour assurer la résilience des cultures face aux défis climatiques futurs.

7. Références bibliographiques

7.1 Livres et articles scientifiques

Antoine, Michael, Claire Chalon, Frédéric Darboux, Mathieu Javaux, et Charles Biielders. 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 ». <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.11.003>.

ASCE/EWRI Curve Number Hydrology Task Committee, Richard H. Hawkins, et Environmental and Water Resources Institute (U.S.), éd. 2009. *Curve Number Hydrology: State of the Practice*. Reston, Va: American Society of Civil Engineers.

Ault, Toby R. 2020. « On the essentials of drought in a changing climate ». *Science* 368 (6488): 256-60. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5492>.

Belis, Jonathan. 2018. « Etude du combiné de semis ERuiStop dans la lutte contre l'érosion en culture de maïs ». Mémoire UCLouvain, 107 pages.

Bouma, Jetske A., Seema S. Hegde, et Ralph Lasage. 2016. « Assessing the returns to water harvesting: A meta-analysis ». *Agricultural Water Management* 163 (janvier):100-109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.012>

Brás, Teresa Armada, Júlia Seixas, Nuno Carvalhais, et Jonas Jägermeyr. 2021. « Severity of Drought and Heatwave Crop Losses Tripled over the Last Five Decades in Europe ». *Environmental Research Letters* 16 (6): 065012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf004>.

Buras, Allan, Anja Rammig, et Christian S. Zang. 2020. « Quantifying Impacts of the 2018 Drought on European Ecosystems in Comparison to 2003 ». *Biogeosciences* 17 (6): 1655-72. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1655-2020>.

Ciais, Ph, M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogée, V. Allard, M. Aubinet, et al. 2005. « Europe-Wide Reduction in Primary Productivity Caused by the Heat and Drought in 2003 ». *Nature* 437 (7058): 529-33. <https://doi.org/10.1038/nature03972>.

Clavel, Danièle, Albert Barro, Tesfay Belay, Rabah Lahmar, et Florent Maraoux. 2009. « Changements techniques et dynamique d'innovation agricole en Afrique Sahélienne: le cas du Zaï mécanisé au Burkina Faso et de l'introduction d'une cactée en Ethiopie ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Volume 8 Numéro 3 (janvier). <https://doi.org/10.4000/vertigo.7442>.

Clement, Timothée, Charles L. Biielders, Aurore Degré, Gilles Manssens, et Guy Foucart. 2023. « Soil pitting mitigates runoff, erosion and pesticide surface losses in maize crops in the Belgian loess belt ». *Soil and Tillage Research* 234 (octobre):105853. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105853>

Cook, Benjamin I., Ron L. Miller, et Richard Seager. 2009. « Amplification of the North American "Dust Bowl" drought through human-induced land degradation ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (13): 4997-5001. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810200106>.

Critchley, W., K. Siegert, C. Chapman, et M. Finket. 2013. *Water Harvesting: A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production*. Scientific Publishers. Publié le 1 janvier 2013, 163 pages.

Crocetti et al. 2020. « Earth Observation for agricultural drought monitoring in the Pannonian Basin (southeastern Europe): current state and future directions | Regional Environmental Change ». 2020. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-020-01710-w>.

Dai, Aiguo. 2011. « Drought under Global Warming: A Review ». *WIREs Climate Change* 2 (1): 45-65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>.

Delcour, Alice, Florence Van Stappen, Stéphanie Gheysens, Virginie Decruyenaere, Didier Stilmant, Philippe Burny, Fabienne Rabier, Hélène Louppe, et Jean-Pierre Goffart. 2014. « État des lieux des flux céréaliers en Wallonie selon différentes filières d'utilisation ». *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 18 (2). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/171015>.

European Commission, Joint Research Centre, Cammalleri, C., Naumann, G., Mentaschi, L. et al. 2020, *Global warming and drought impacts in the EU – JRC PESETA IV project – Task 7*, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/597045>

Greener Land. s. d. Consulté le 26 mai 2024. <https://www.greener.land/index.php/product/demi-lunes-semi-circular-bunds/>.

Fink, Andreas, Tim Brücher, Andreas Krüger, G.C. Leckebusch, Joaquim Pinto, et Uwe Ulbrich. 2004. « The 2003 European Summer Heatwaves and Drought –Synoptic Diagnosis and Impacts ». *Weather* 59 (août):209-16. <https://doi.org/10.1256/wea.73.04>.

Forzieri, Giovanni, L. Feyen, Rodrigo Rojas, Martina Flörke, Florian Wimmer, et Alessandra Bianchi. 2014. « Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe ». *Hydrology and Earth System Sciences* 18 (janvier). <https://doi.org/10.5194/hess-18-85-2014>.

García-Herrera, Ricardo, Jose M. Garrido-Perez, David Barriopedro, Carlos Ordóñez, Sergio M. Vicente-Serrano, Raquel Nieto, Luis Gimeno, Rogert Sorí, et Pascal Yiou. 2019. « The European 2016/17 Drought ». *Journal of Climate* 32 (11): 3169-87. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0331.1>.

García-León, David, Gabriele Standardi, et Andrea Staccione. 2021. « An integrated approach for the estimation of agricultural drought costs ». *Land Use Policy* 100 (janvier):104923. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104923>.

Gerard, C. J., P. D. Sexton, et D. M. Conover. 1984. « Effect of Furrow Diking, Subsoiling, and Slope Position on Crop Yields¹ ». *Agronomy Journal* 76 (6): 945-50. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600060019x>.

Gnoumou, X, Jérôme Yameogo, Traoré Mamadou, G Bazongo, et P Bazongo. 2017. « Adaptation aux changements climatiques en Afrique sub-saharienne: impact du zaï et des semences améliorées sur le rendement du sorgho dans les villages de Loaga et Sika (province du Bam), Burkina Fas » 19 (février): ISSN : 2028-9324

Grillakis, Manolis G. 2019. « Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change ». *Science of The Total Environment* 660 (avril):1245-55. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.001>.

- Hanel, Martin, Oldřich Rakovec, Yannis Markonis, Petr Máca, Luis Samaniego, Jan Kyselý, et Rohini Kumar.** 2018. « Revisiting the Recent European Droughts from a Long-Term Perspective ». *Scientific Reports* 8 (1): 9499. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27464-4>.
- Harris, Ian, Timothy J. Osborn, Phil Jones, et David Lister.** 2020. « Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset ». *Scientific Data* 7 (1): 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.
- Ionita, Monica, et Viorica Nagavciuc.** 2021. « Changes in Drought Features at the European Level over the Last 120 Years ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21 (5): 1685-1701. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1685-2021>.
- Ionita, Monica, Lena M. Tallaksen, Daniel G. Kingston, James H. Stagge, Gregor Laaha, Henny A. J. Van Lanen, Patrick Scholz, Silvia M. Chelcea, et Klaus Haslinger.** 2017. « The European 2015 Drought from a Climatological Perspective ». *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (3): 1397-1419. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1397-2017>.
- IPCC.** Climate Change 2007: The Physical Science Basis | GlobalChange.gov ». s. d. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_fr.pdf
- Kelil, Siraj, Sisay Taye, Tadesse Negash, et Jaldessa Doyo.** 2023. « Effects of rangeland based integrated soil and water conservation practices on herbaceous species regeneration, diversity, biomass and growth of planted tree species in Haro-Bake Sub-Watershed, Yaballo District, and Southern Ethiopia ». *International Journal of Biodiversity and Conservation* 15 (octobre):134-44. <https://doi.org/10.5897/IJBC2023.1593>.
- Komariah Komariah,** 2013. "The development of water harvesting research for agriculture", Reviews in Agricultural Science 1. DOI:[10.7831/ras.1.31](https://doi.org/10.7831/ras.1.31)
- Kuzma, Samantha, Liz Saccoccia, et Marlina Chertock.** 2023. « 25 Countries, Housing One-Quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress », août. <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>.
- Lambert, Richard, B. Van der veeren, Christian Decamps, S. Cremer, Marc De Toffoli, et Mathieu Javaux.** 2020. « Production fourragère et sécheresse, quelles solutions pour la Wallonie ? » In . <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:244104>.
- Ling, L., et Z. Yusop.** 2014. « A Micro Focus with Macro Impact: Exploration of Initial Abstraction Coefficient Ratio (λ) in Soil Conservation Curve Number (CN) Methodology ». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 18 (1): 012121. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012121>.
- Luterbacher, Jürg, Mark Liniger, Annette Menzel, Nicole Estrella, Paul Della-Marta, Christian Pfister, et Elena Xoplaki.** 2007. « Auxiliary Material: The exceptional European warmth of Autumn 2006 and Winter 2007: Historical context, the underlying dynamics and its phenological impacts ». *Geophysical Research Letters* 34 (juin). <https://doi.org/10.1029/2007GL029951>.
- Martin, Philippe, Yves Le Bissonnais, Hassan Benkhadra, Laurence Ligneau, et Jean-François Ouvry.** 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* 3 (2): 143-54. <https://doi.org/10.3406/morfo.1997.911>.

Mohamed, Bensaada, Boualem Remini, et A Abada. 2007. « ETUDE COMPARATIVE DES GALERIES DE DRAINAGE DE LA HESBAYE (WALLONIE) AVEC CELLE DES FOGGARAS DU SAHARA ALGÉRIEN » 60 (janvier):45-50.

Mohamed Sallah, Abdoul-Hamid, Bernard Tychon, Isabelle Piccard, Anne Gobin, Roel Van Hoolst, Bakary Djaby, et Joost Wellens. 2019. « Batch-processing of AquaCrop plug-in for rainfed maize using satellite derived Fractional Vegetation Cover data ». *Agricultural Water Management* 217 (mai):346-55. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.016>.

Naresh Kumar, M., C. S. Murthy, M. V. R. Sesha Sai, et P. S. Roy. 2009. « On the Use of Standardized Precipitation Index (SPI) for Drought Intensity Assessment ». *Meteorological Applications* 16 (3): 381-89. <https://doi.org/10.1002/met.136>.

Naumann, Gustavo, Carmelo Cammalleri, Lorenzo Mentaschi, et Luc Feyen. 2021a. « Increased Economic Drought Impacts in Europe with Anthropogenic Warming ». *Nature Climate Change* 11 (6): 485-91. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01044-3>.

Obala, Desmond, Felista Muriu, Harun Kiruki, Festus Mutiso, et Charles Ndung'u. 2022. « Effects of Negarim Micro Catchment on Growth and Survival of Two Provenances of Moringa oleifera Under Different Spacing in a Semi-Arid Area of Kitui County, Kenya ». *East African Journal of Environment and Natural Resources* 5 (novembre):14-28. <https://doi.org/10.37284/eajenr.5.2.927>.

Olivier, C, J.P. Goffart, Dirk Baets, Dimitri Xanthoulis, Nat Fonder, Georges Lognay, J Barthélemy, et Pierre Lebrun. 2014. « USE OF MICRO-DAMS IN POTATO FURROWS TO REDUCE EROSION AND RUNOFF AND MINIMISE SURFACE WATER CONTAMINATION THROUGH PESTICIDES ». *Communications in agricultural and applied biological sciences* 79 (janvier):513-24.

Oweis, Theib, Dieter Prinz, et Ahmed Hachum. 2001. « Water Harvesting: Indigenous Knowledge for the Future of the Drier Environments », décembre. <https://repo.mel.cgiar.org/handle/20.500.11766/67750>.

Poudel, Rashmi. 2023. « Effects of Drought Stress on Growth and Yield Parameters of Zea Mays-A Comprehensive Review », septembre, 67-70. <https://doi.org/10.26480/amdn.02.2023.67.70>.

Pradhan, Raseswari, et Jayaprakash Sahoo. 2019. « Smart Rainwater Management: New Technologies and Innovation ». In . <https://doi.org/10.5772/intechopen.86336>.

Safriel, Uriel, et and Sliman. 2007. *Building Bridges of Confidence through Technical Dialogue*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24760.24326>.

Sambalino, Francesco, et Frank Steenbergen. 2012. *Securing Water and Land in the Tana Basin: a resource book for water managers and practitioners*.

Schubert, Siegfried D., Ronald E. Stewart, Hailan Wang, Mathew Barlow, Ernesto H. Berbery, Wenju Cai, Martin P. Hoerling, et al. 2016. « Global Meteorological Drought: A Synthesis of Current Understanding with a Focus on SST Drivers of Precipitation Deficits ». *Journal of Climate* 29 (11): 3989-4019. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0452.1>.

Seneviratne, Sonia, Neville Nicholls, David Easterling, C. Goodess, S Kanae, J Kossin, Yuwei Luo, et al. 2012. « Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment ». In <https://doi.org/10.7916/d8-6nbt-s431>.

Singh, Ashutosh, Himanshu Pandey, Saurabh Pandey, Dalpat Lal, Divya Chauhan, Aparna, Suresh H. Antre, Santhosh B, et Amarjeet Kumar. 2023. « Drought Stress in Maize: Stress Perception to

Molecular Response and Strategies for Its Improvement ». *Functional & Integrative Genomics* 23 (4): 296. <https://doi.org/10.1007/s10142-023-01226-6>.

Spinoni, Jonathan, Gustavo Naumann, Jürgen Vogt, et Paulo Barbosa. 2015. « European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach ». *Global and Planetary Change* 127 (avril):50-57. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>.

Spinoni, Jonathan, Jürgen V. Vogt, Gustavo Naumann, Paulo Barbosa, et Alessandro Dosio. 2018. « Will Drought Events Become More Frequent and Severe in Europe? » *International Journal of Climatology* 38 (4): 1718-36. <https://doi.org/10.1002/joc.5291>.

Stagge, James, L.M. Tallaksen, Chong-Yu Xu, et Henny Van Lanen. 2014. « Standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI): Sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters ». *IAHS Publ.* 363 (octobre):367-73.

Thibaut, Kevin et Catas. 2020. « Les sécheresses en Belgique (Wallonie): analyse d'un épisode récent (2018) et perception du phénomène dans le cadre du système de planification d'urgence et de gestion de crise ». <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/11265>. Mémoire Université de Liège, 93 pages.

Thibaut, Kevin, et Pierre Ozer. 2021. « Les sécheresses en Wallonie, un nouveau défi du changement climatique ? Quelques pistes pour améliorer la gestion de ce phénomène. » *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales* 45 (3). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/266096>.

Rwehumbiza, F.B.R; Mahoo, H.F; Hatibu, N; Reuben; Makungu, P J.J. and Ashimogo, G.C. Faculty of Agriculture, Sokoine University of Agriculture. "Tie-ridging as a rainwater harvesting technique" <http://www.tzonline.org/pdf/tieridgingasarainwaterharvesting.pdf>

Tolossa, Tasisa Temesge, Firew Bekele Abebe, et Anteneh Abebe Girma. 2020. « Review: Rainwater harvesting technology practices and implication of climate change characteristics in Eastern Ethiopia ». Édité par Fatih Yildiz. *Cogent Food & Agriculture* 6 (1): 1724354. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1724354>.

Trenberth, Kevin E., Aiguo Dai, Gerard van der Schrier, Philip D. Jones, Jonathan Barichivich, Keith R. Briffa, et Justin Sheffield. 2014. « Global Warming and Changes in Drought ». *Nature Climate Change* 4 (1): 17-22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>.

Tripathy, Kumar Puran, et Ashok Kumar Mishra. 2023. « How Unusual Is the 2022 European Compound Drought and Heatwave Event? » *Geophysical Research Letters* 50 (15): e2023GL105453. <https://doi.org/10.1029/2023GL105453>.

Van Loon, Anne F. 2015. « Hydrological Drought Explained ». *WIREs Water* 2 (4): 359-92. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>.

Van Loon, Anne, et Henny Van Lanen. 2012. « A process-based typology of hydrological drought ». *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (juillet):1915-46. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1915-2012>.

Vicente-Serrano, Sergio M., Juan-I. Lopez-Moreno, Santiago Beguería, Jorge Lorenzo-Lacruz, Arturo Sanchez-Lorenzo, José M. García-Ruiz, Cesar Azorin-Molina, et al. 2014. « Evidence of Increasing Drought Severity Caused by Temperature Rise in Southern Europe ». *Environmental Research Letters* 9 (4): 044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>.

Wang, Guiling. 2005. « Agricultural drought in a future climate: Results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment ». *Climate Dynamics* 25 (décembre):739-53. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0057-9>.

Wells, Nathan, Steve Goddard, et Michael J. Hayes. 2004. « A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index ». *Journal of Climate* 17 (12): 2335-51. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2335:ASPDSEI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSEI>2.0.CO;2).

7.2 Documents et pages web

CIPF - Le maïs en Wallonie, 2024a. Consulté le 13 avril 2024. A partir de <https://cipf.be/fr/mais/mais-en-wallonie>.

CIPF - Préparations de sol adaptées 2024b. Consulté le 5 janvier 2024. A partir de <https://cipf.be/fr/mais/travail-protection-sol/lutte-ruissellement-erosion/preparation-sol-adaptees>.

CHAMBRE D'AGRICULTURE CHARENTE-MARITIME « fourrage 2023, des repères de prix ». 2023 Consulté le 20 mai 2024 à partir de https://cmds.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Nouvelle-Aquitaine/1779_Publications/Fourrages_prix_2023_230531.pdf

CRED and UNISDR: Economic losses, poverty & disasters: 1998–2017. A partir de: https://www.unisdr.org/files/61119_credeconomiclosses.pdf, 2018.

European Commission. 2023. « Water Scarcity and Droughts ». Consulté le 11 décembre 2023 à partir de https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-scarcity-and-droughts_en.

European Environment Agency “Mapping the Impacts of Natural Hazards and Technological Accidents in Europe” . s.d. Consulté le 30 décembre 2023 à partir de <https://www.eea.europa.eu/publications/mapping-the-impacts-of-natural>.

FAO, 2024a. Consulté le 26 mai 2024 à partir de <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1506285/>.

FAO, 2024b. Manuel Reference Aquacrop. A partir de :<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/37ef03ba-6b8c-4558-b057-0e52a87f53a5/content>

IUCN : Life in a Changing Climate: How Healthy Soils Can Boost Food Security and Climate Resilience for Millions . 2017. Consulté le 12 septembre 2017 à partir de <https://www.iucn.org/news/secretariat/201709/life-changing-climate-how-healthy-soils-can-boost-food-security-and-climate-resilience-millions>.

Protect’eau : « Le mag’ » n°2, 44 pages. <https://www.protecteau.be/sites/default/files/uploads/MAG/mag02.pdf>

SPW. (2020) « Mesures de protection de sols agricoles - Portail de l’agriculture wallonne ». Agriculture en Wallonie. Consulté le 29 mai 2024. <http://agriculture.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/agriculture/home/ruralite/protection-des-sols/prevention-et-lutte-contre-l-erosion-des-sols/mesures-de-protection-de-sols-agricoles.html>.

SPW (2022) Agriculture, Ressources naturelles et Environnement ». s. d. Consulté le 6 janvier 2024 à partir de <https://www.wallonie.be/fr/acteurs-et-institutions/wallonie/service-public-de-wallonie/spw-agriculture-ressources-naturelles-et-environnement>.

SPW (2024) FAQ Sécheresse ». s. d. Consulté le 6 janvier 2024 à partir de <https://www.wallonie.be/fr/faq-secheresse>.

USDA. s. d. Consulté le 27 mai 2024 à partir de <https://www.ars.usda.gov/news-events/news/research-news/2009/it-pays-to-furrow-dike/>.

USGS. 2019. « Infiltration and the Water Cycle | U.S. Geological Survey ». 2019. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/infiltration-and-water-cycle>.

VRT, 2019. Consulté le 26/05/2024 à partir de https://www.vrt.be/vrtnws/fr/2019/08/07/une-penurie-d_eau-atteint-un-quart-de-la-population-mondiale-y/.

WalOnMap . s. d. Consulté le 3 juin 2024. <http://geoportail.wallonie.be/walonmap>.

7.3 Documents non publiés

Rapports CIPF

CIPF, 2012. 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

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

CIPF, 2014. 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

CIPF, 2015. 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

CIPF, 2016. 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

CIPF, 2017. 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

8. Annexes

1. Fichier « BELCAM » du maïs calibré pour la wallonie (Salah et al. (2019))

BELCAM Maize, Calendar (Belgium, 2015-2017)

- 7.0 : AquaCrop Version (June 2021)
- 0 : File protected
- 2 : fruit/grain producing crop
- 1 : Crop is sown
- 1 : Determination of crop cycle : by calendar days
- 1 : Soil water depletion factors (p) are adjusted by ETo
- 8.0 : Base temperature (°C) below which crop development does not progress
- 30.0 : Upper temperature (°C) above which crop development no longer increases with an increase in temperature
- 9 : Total length of crop cycle in growing degree-days
- 0.14 : Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Upper threshold
- 0.74 : Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Lower threshold
- 2.9 : Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion (0.0 = straight line)
- 0.69 : Soil water depletion fraction for stomatal control (p - sto) - Upper threshold
- 6.0 : Shape factor for water stress coefficient for stomatal control (0.0 = straight line)
- 0.69 : Soil water depletion factor for canopy senescence (p - sen) - Upper threshold
- 2.7 : Shape factor for water stress coefficient for canopy senescence (0.0 = straight line)
- 50 : Sum(ETo) during dormant period to be exceeded before crop is permanently wilted
- 1 : Soil water depletion factor for pollination (p - pol) - Upper threshold
- 5 : Vol% for Anaerobic point (* (SAT - [vol%]) at which deficient aeration occurs *)
- 50 : Considered soil fertility stress for calibration of stress response (%)
- 25.00 : Response of canopy expansion is not considered
- 25.00 : Response of maximum canopy cover is not considered
- 25.00 : Response of crop Water Productivity is not considered
- 25.00 : Response of decline of canopy cover is not considered
- 9 : dummy - Parameter no Longer required
- 10 : Minimum air temperature below which pollination starts to fail (cold stress) (°C)
- 40 : Maximum air temperature above which pollination starts to fail (heat stress) (°C)
- 12.0 : Minimum growing degrees required for full crop transpiration (°C - day)
- 2 : Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop starts to be affected by soil salinity (dS/m)
- 10 : Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop can no longer grow (dS/m)
- 9 : Dummy - no longer applicable
- 25 : Calibrated distortion (%) of CC due to salinity stress (Range: 0 (none) to +100 (very strong))
- 100 : Calibrated response (%) of stomata stress to ECsw (Range: 0 (none) to +200 (extreme))
- 1.05 : Crop coefficient when canopy is complete but prior to senescence (KcTr,x)
- 0.300 : Decline of crop coefficient (%/day) as a result of ageing, nitrogen deficiency, etc.
- 0.30 : Minimum effective rooting depth (m)
- 1.20 : Maximum effective rooting depth (m)
- 13 : Shape factor describing root zone expansion
- 0.045 : Maximum root water extraction (m³water/m³soil.day) in top quarter of root zone

0.011 : Maximum root water extraction (m³water/m³soil.day) in bottom quarter of root zone
 50 : Effect of canopy cover in reducing soil evaporation in late season stage
 6.50 : Soil surface covered by an individual seedling at 90 % emergence (cm²)
 6.50 : Canopy size of individual plant (re-growth) at 1st day (cm²)
 75000 : Number of plants per hectare
 0.12500 : Canopy growth coefficient (CGC): Increase in canopy cover (fraction soil cover per day)
 -9 : Maximum decrease of Canopy Growth Coefficient in and between seasons - Not Applicable
 -9 : Number of seasons at which maximum decrease of Canopy Growth Coefficient is reached - Not Applicable
 -9.0 : Shape factor for decrease Canopy Growth Coefficient - Not Applicable
 0.90 : Maximum canopy cover (CCx) in fraction soil cover
 0.05500 : Canopy decline coefficient (CDC): Decrease in canopy cover (in fraction per day)
 10 : Calendar Days: from sowing to emergence
 105 : Calendar Days: from sowing to maximum rooting depth
 107 : Calendar Days: from sowing to start senescence
 160 : Calendar Days: from sowing to maturity (length of crop cycle)
 106 : Calendar Days: from sowing to flowering
 13 : Length of the flowering stage (days)
 1 : Crop determinancy linked with flowering
 50 : Excess of potential fruits (%)
 34 : Building up of Harvest Index starting at flowering (days)
 29.3 : Water Productivity normalized for ET_o and CO₂ (WP*) (gram/m²)
 100 : Water Productivity normalized for ET_o and CO₂ during yield formation (as % WP*)
 50 : Crop performance under elevated atmospheric CO₂ concentration (%)
 52 : Reference Harvest Index (HI_o) (%)
 0 : Possible increase (%) of HI due to water stress before flowering
 7.0 : Coefficient describing positive impact on HI of restricted vegetative growth during yield formation
 3.0 : Coefficient describing negative impact on HI of stomatal closure during yield formation
 15 : Allowable maximum increase (%) of specified HI
 -9 : GDDays: from sowing to emergence
 -9 : GDDays: from sowing to maximum rooting depth
 -9 : GDDays: from sowing to start senescence
 -9 : GDDays: from sowing to maturity (length of crop cycle)
 -9 : GDDays: from sowing to flowering
 -9 : Length of the flowering stage (growing degree days)
 -9.000000 : CGC for GDDays: Increase in canopy cover (in fraction soil cover per growing-degree day)
 -9.000000 : CDC for GDDays: Decrease in canopy cover (in fraction per growing-degree day)
 -9 : GDDays: building-up of Harvest Index during yield formation
 90 : dry matter content (%) of fresh yield
 0.00 : Minimum effective rooting depth (m) in first year - required only in case of regrowth
 0 : Crop is transplanted in 1st year - required only in case of regrowth
 0 : Transfer of assimilates from above ground parts to root system is NOT considered
 0 : Number of days at end of season during which assimilates are stored in root system
 0 : Percentage of assimilates transferred to root system at last day of season
 0 : Percentage of stored assimilates transferred to above ground parts in next season

2. Résultats liés au calcul du curve number du rouleau

Tableau 5 : Dsmax en fonction de la pente ajusté pour l'étude de Clément et al. (2023)

Pente (%)	Dsmax "ajusté"
0	4,142
5	3,093
10	2,508
15	2,120
20	1,816
25	1,575

Tableau 6 : Curve number du témoin en fonction de la pente pour l'étude de Clément et al. (2023)

pente (%)	CN témoin
0	60,3
5	65,6
10	68,2
15	69,5
20	68,5
25	69,7

Tableau 7 : abstractions initiales du témoin en fonction de la pente pour l'étude de Clément et al. (2023)

Pente (%)	la rouleau
0	12,51
5	9,77
10	8,43
15	7,69
20	7,21
25	6,89

Tableau 8 : Curve number du témoin en fonction de la pente pour l'étude de Clément et al. (2023)

Pente (%)	CN rouleau
0	50,37
5	56,53
10	60,10
15	62,29
20	63,77
25	64,84

3. CN du témoin et du rouleau 10 centimètres

Tableau 9 : Curve number du témoin et du rouleau « 10 centimètres » en fonction du CN

Pente (%)	CN témoin	CN rouleau 10 cm
0	60,3	46,3
5	65,6	51,9
10	68,2	54,3
15	69,5	55,9
20	68,5	63,8
25	69,7	100,0

4. Pluviométrie, température et rayonnement des différentes années simulés

Tableau 10 : pluviométrie, température et rayonnement des différentes années simulées entre le 25 février et le 02 octobre

Années	Pluviométrie (mm)	Température (°C)	Rayonnement (J/cm ² /jour)
2022	229,4	16,5	1804,7
2018	243,1	17,3	1580,0
2013	309,2	15,3	1600,4
2009	431,1	15,9	1580,5
2002	536,6	15,77	1099,4
2008	674,1	15,36	1430,8

5. Tableau représentatif d'un scénario de l'objectif 1

scénario 12 : année sèche (épaisseur 1,2 mètre)										
Témoin										
Pente	CN	biomasse	Rendement	ruissellement	pluviométrie	Eto	stress hydrique	Stress (fermeture stomatique)	Stress température	
0,10	60,27	19,36	9,72	0,90	226,70	730,00	-304,20	15,00	23,00	
5,00	65,55	19,33	9,70	1,70	226,70	730,00	-305,00	15,00	23,00	
10,00	68,20	19,30	9,68	2,40	226,70	730,00	-305,70	15,00	23,00	
15,00	69,52	19,30	9,68	2,70	226,70	730,00	-306,00	15,00	23,00	
20,00	70,18	19,30	9,68	2,70	226,70	730,00	-306,00	15,00	23,00	
Rouleau antiérosif										
Pente	CN	biomasse	Rendement	ruissellement	pluviométrie	Eto	stress hydrique	Stress (fermeture stomatique)	Stress température	
0,10	50,37	19,36	9,72	0,30	226,70	730,00	-303,60	15,00	23,00	
5,00	56,53	19,36	9,72	0,60	226,70	730,00	-303,90	15,00	23,00	
10,00	60,10	19,36	9,72	0,90	226,70	730,00	-304,20	15,00	23,00	
15,00	62,29	19,34	9,72	1,10	226,70	730,00	-304,40	15,00	23,00	
20,00	63,77	19,34	9,72	1,30	226,70	730,00	-304,60	15,00	23,00	

Figure 52 : Exemple de résultats d'un scénario de l'objectif 1

6. Réserve utile du sol en début de simulation pour les différents scénarios

Tableau 11 : réserve utile du sol en fonction de l'épaisseur et de la charge caillouteuse d'un sol

épaisseur et charge caillouteuse	réserve utile dans le sol (L/m ²)
sol 1,6 mètre	320
sol 1,6 mètre à charge caillouteuse 20%	281,6
sol 1,2 mètre	240
sol 1,2 mètre à charge caillouteuse 20%	211,2
sol 1 mètre	200
sol 1 mètre à charge caillouteuse 20%	176
sol 0,8 mètre	160
sol 0,8 mètre à charge caillouteuse 20%	140,8

7. Synthèse des scénarios simulés

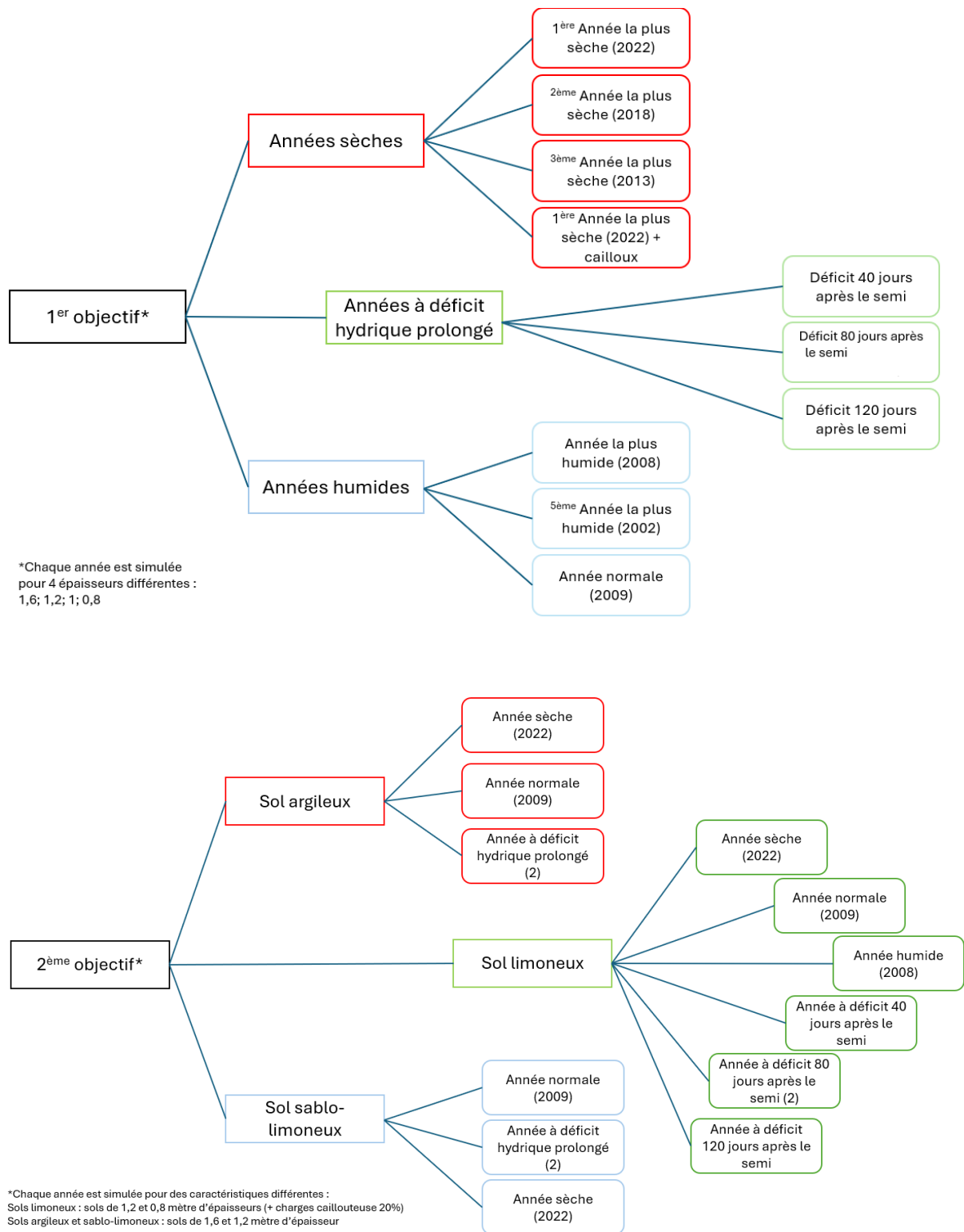
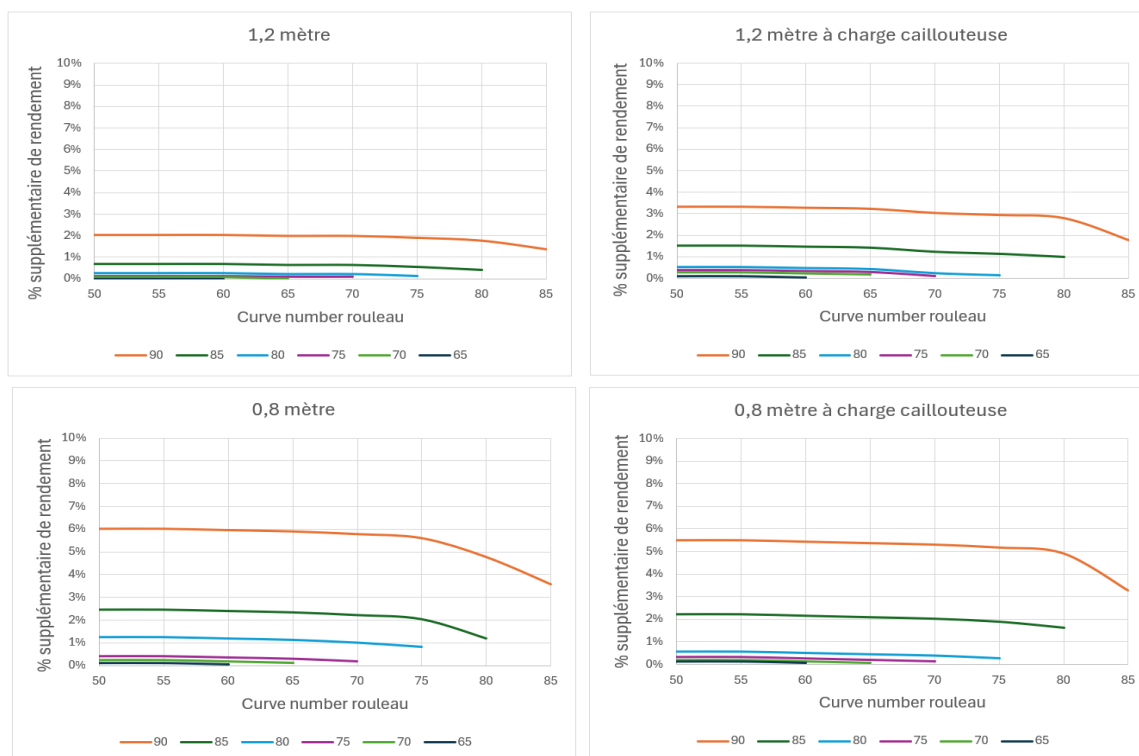


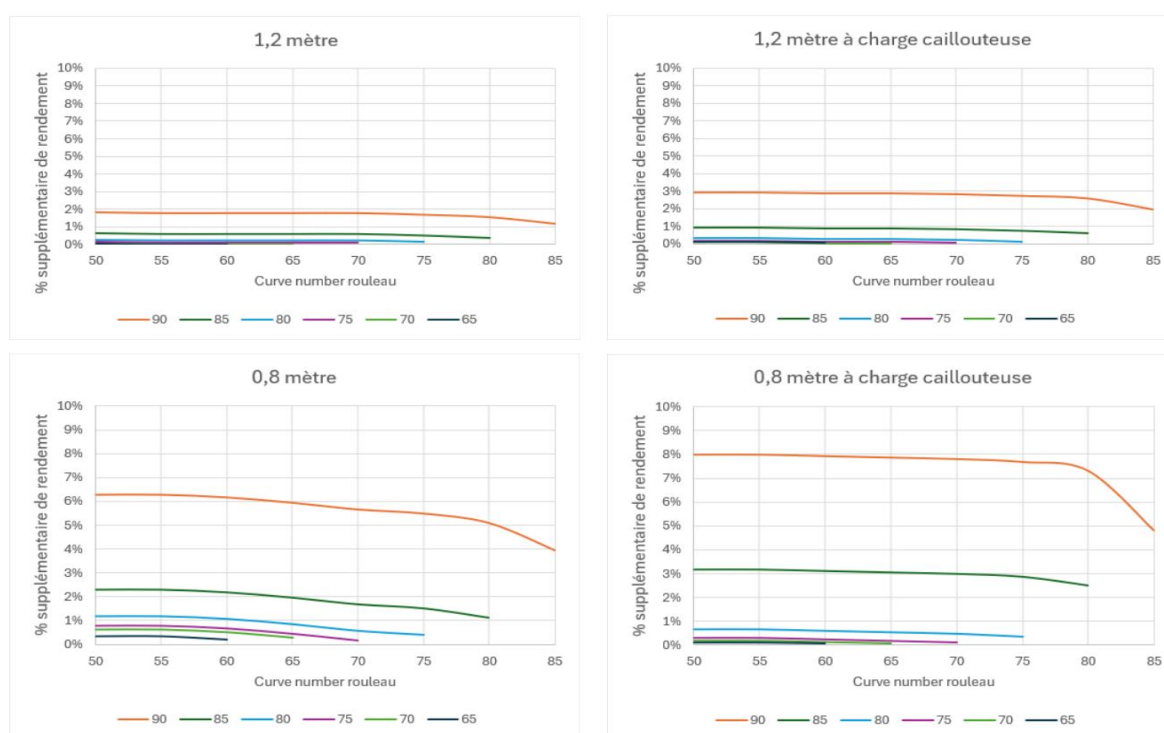
Figure 53 : Synthèse des scénarios simulés pour le sous objectif 1 et 2

8. Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number pour les années à déficit hydrique prolongé

Déficit hydrique 40 jours après le semi



Déficit hydrique 80 jours après le semi



Déficit hydrique 120 jours après le semis

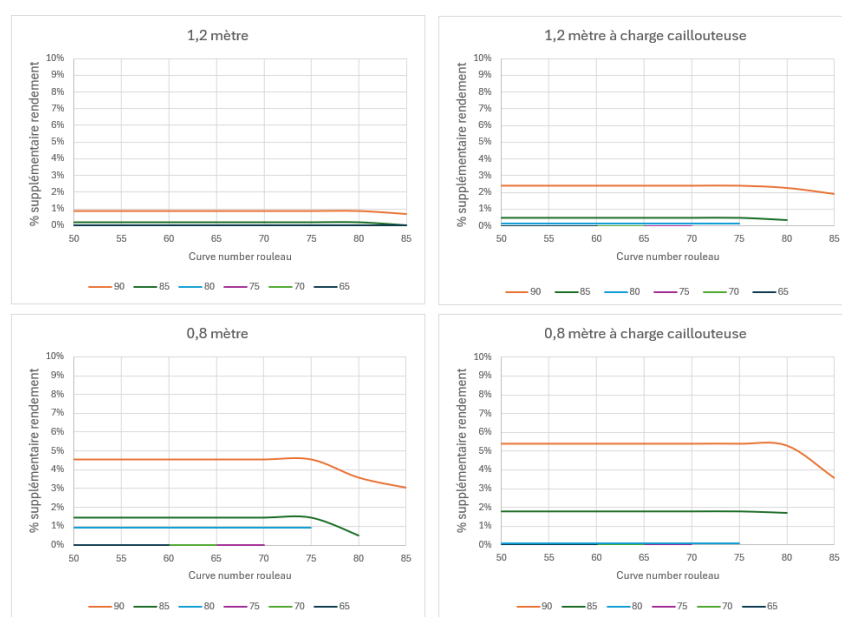


Figure 54 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number pour 3 années à déficit hydrique prolongé (40,80 et 120 jours après le semis) sur sol limoneux pour des sols d'épaisseur de 1,2 mètre, de 0,8 mètre, des sols à charge caillouteuse et de 1,2 et 0,8 mètre d'épaisseur.

9. Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number pour une année normale

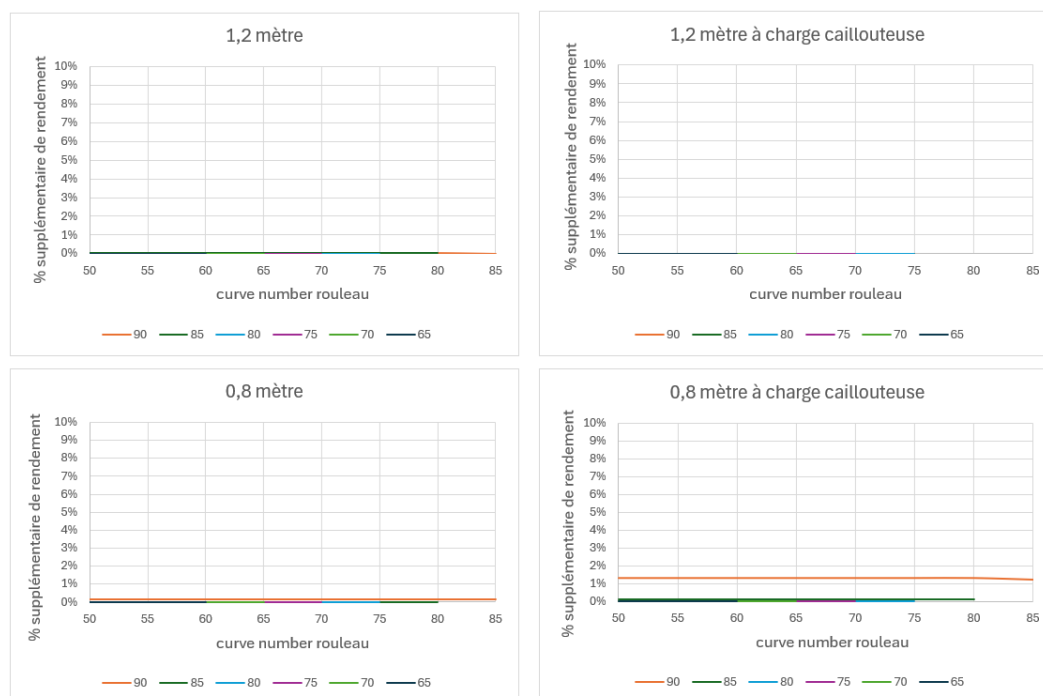


Figure 55 : Pourcentage supplémentaire de rendement en fonction du curve number pour une année normale sur sol limoneux pour des sols d'épaisseur de 1,2 mètre, de 0,8 mètre, des sols de 1,2 mètre à charge caillouteuse et des sols de 0,8 mètre à charge caillouteuse. Les différentes courbes de couleurs représente le rendement supplémentaire que le rouleur pourrait apporter par rapport au témoin.

10. ruissellement en fonction du curve number pour les sols sablo-limoneux

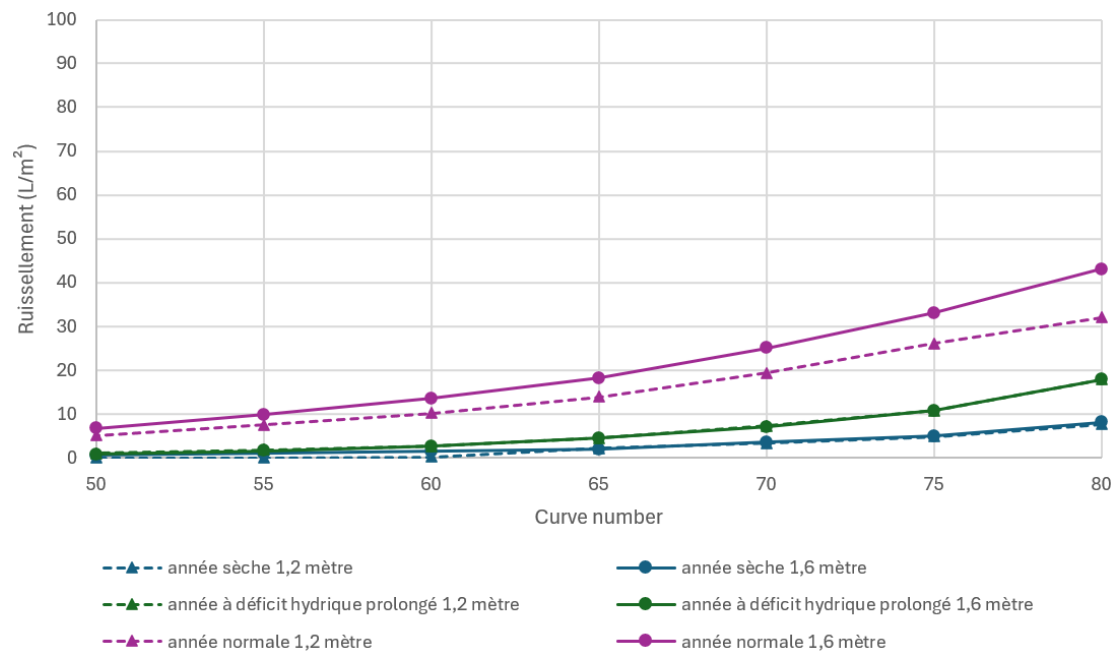


Figure 56 : ruissellement en fonction du curve number pour les sols sablo-limoneux

Sécheresse et rendement en culture de maïs : Analyse de l'impact du rouleau anti-érosif en Wallonie

Présenté par Dorian Hennion

Résumé :

La culture du maïs, largement répandue en Wallonie, fait face à un double défi. Elle présente un risque accru à l'érosion lors de fortes précipitations et peut subir une diminution de ses rendements en cas de précipitations insuffisantes. Afin de lutter contre l'érosion, le rouleau anti-érosif, imaginé par le CIPF, a déjà fait ses preuves en réduisant de manière considérable le ruissellement. Dans ce contexte, il est pertinent de se demander si l'implantation de micro-dépressions, créées par le rouleau anti-érosif peut également atténuer le stress hydrique en année sèche, en augmentant la quantité d'eau disponible pour la plante.

Pour répondre à cette question, ce mémoire cherche à évaluer si les micro-dépressions peuvent limiter la perte de rendement du maïs fourrager en années sèches en augmentant le stockage à la surface du sol. Le logiciel de simulation de croissance de culture Aquacrop est utilisé afin d'investiguer différentes situations.

Dans un premier temps, l'analyse se concentre sur les effets du rouleau anti-érosif sur la mitigation des pertes de rendement dans un sol de la région limoneuse en Wallonie pour des années sèches récentes, en étudiant l'influence de la pente et de l'épaisseur du sol. Par la suite, une seconde analyse examine une gamme plus étendue de sols afin d'identifier ceux pour lesquels le rouleau anti-érosif est le plus intéressant.

Les résultats mettent en évidence que l'impact du rouleau anti-érosif sur le rendement du maïs dans les sols limoneux du nord de la Wallonie est limité, en raison de leur bonne capacité de rétention en eau. Cependant, ils indiquent que ce dispositif se révèle efficace pour atténuer le stress hydrique dans certains types de sols, notamment ceux présentant une faible capacité d'infiltration.

Mots-clés : maïs, sécheresse, micro-dépressions, curve number

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro