

**Quel est le potentiel de l'Hydrologie  
régénérative ?  
Modélisation sur un bassin versant agricole**

LISA DI MAGGIO

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2022 - 2023**

**PROMOTEURS : PR. AURORE DEGRÉ**







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

Le présent document n'engage que son auteur.

**Quel est le potentiel de l'Hydrologie  
régénérative ?  
Modélisation sur un bassin versant agricole**

LISA DI MAGGIO

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2022 - 2023**

**PROMOTEURS : PR. AURORE DEGRÉ**

# Remerciements

Tout d'abord, je tenais à exprimer ma gratitude envers ma promotrice, Aurore Degré. Non seulement pour son engagement dans la direction de ce travail, sa disponibilité et ses conseils éclairés, mais également pour son investissement au sein de la communauté académique. Observer votre dévouement a été une source constante d'inspiration et de motivation pour moi. Cela m'a régulièrement incité à initier des changements, à donner le meilleur de moi-même, et en fin de compte, à acquérir les compétences essentielles pour mener à bien mes projets.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements aux membres de mon jury : Joost Wellens, Grégory Mahy, Benjamin Guillaume et Catherine Charles pour leurs conseils et leurs commentaires, tout au long de ce travail.

Je tenais également à remercier l'équipe Vesdre, Benjamin, Adrien et Manu pour leur expertise, leur aide technique, leur encadrement pédagogie et leur patience infailible.

Je remercie ma soeur, Barbara, pour sa relecture attentive et ses conseils précieux.

Je saisis l'occasion pour exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à orchestrer la fin de ce parcours de master. Je pense en particulier à Mme Colaux, Mme Marion Vandaele et M. Heinesch pour leurs conseils avisés.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à la DEEP pour m'avoir accueilli durant cet été. Concilier ces deux responsabilités n'a pas toujours été simple, mais vous m'avez offert l'environnement le plus propice et agréable pour mener à bien cette tâche. Merci à Antoine, Sam, Marie, Andyne, Harold, Virginie, Alain et tous les membres du service.

Merci aux personnes ayant participé à l'excursion Valence : Christophe, Alain, Mathieu et notre guide sur le site des alvéoles, Samuel. Nos discussions riches m'ont permis de voir la portée plus large de ce travail de fin d'études.

Merci à M. Jacques Mignon pour sa recherche bibliographique.

Merci à mes fidèles ami.e.s tfistes, Nono, Marga, Cailloux et Lulu. Qu'aurais-je fait sans votre soutien et votre présence ? Merci pour les blagues, pour les fous rires, pour les balades, pour les conseils, et surtout, merci d'être vous-mêmes.

Merci à l'auberge, pour m'avoir offert un cadre de vie idyllique durant ces 3 dernières années d'étude. Je remercie tant les anciens résidents que les nouveaux pour les projets, les souvenirs, les soirées, les repas conviviaux et pour ces belles années de vie communautaire.

Merci au collectif Zherot et l'ensemble de ses membres pour les nombreux projets accomplis. Merci pour votre dévouement, votre disponibilité et votre implication dans ce projet.

Finalement, je tenais à remercier mes parents pour leur soutien inébranlable. Merci pour la confiance accordée, pour le soutien et pour avoir toujours cru en mes capacités. Alors qu'une aventure se termine, une autre commence et je sais que je pourrais toujours compter sur vous. Aussi, il me tarde de commencer cette nouvelle aventure.

# Abstract

The management of flood and drought-related risks has become a significant concern for our current leaders. Belgium has not been spared, as seen with the floods in July 2021. Following these tragic events, there is a growing consideration to implement measures aimed at reducing runoff. This study focuses on quantifying the cobenefits of keyline design interventions in terms of flood risk reduction and alleviation of drought severity. The study centers on an agricultural watershed in the Herve Plateau region in Belgium, primarily consisting of grasslands. Simultaneously, an analysis of the performance of these interventions based on different soil types is also conducted. The four scenarios explored are : the current situation (Business as Usual), an unfavorable scenario with an expanded area of cultivated land with maize (Rapidly Agricultural Development), keyline design with ditch-bunds and tree planting (Keyline), and a scenario that includes the previous measures along with subsoiling technique (Keyline Subsoiling). Hydrological modeling of the various interventions across the landscape is carried out using the MikeShe software. In the Rapidly Agricultural Development scenario, the model reveals an increase in surface runoff and soil water storage during the dry season due to limited vegetation period. Results demonstrate a reduction in runoff for the Keyline scenario, particularly in terms of maximum discharge at the outlet. The ditch-bunds allow for both managing runoff and infiltrating surface water. However, tree planting leads to significant root water uptake, which could result in reduced photosynthetic activity. Regarding subsoiling, differences in performance between effective drainage and imperfect drainage are observed. The results in this regard highlight the need for further analysis to confirm their effectiveness in various contexts. This study showcases the promising potential of Regenerative Hydrology and underscores the importance of a holistic and adaptive approach for its implementation within a socio-economic context.

# Résumé

La gestion des risques liés aux inondations et aux sécheresses est devenue un enjeu majeur pour nos dirigeants actuels. La Belgique n'est pas épargnée, avec les inondations de juillet 2021. Suite à ces événements dramatiques, une réflexion est amorcée pour créer des aménagements afin de réduire le ruissellement. Ce travail quantifie le cobénéfice des aménagements en keyline design, sur la réduction du risque d'inondations et l'atténuation de la sévérité des sécheresses. Il se concentre sur un bassin versant agricole dans la région du plateau de Herve en Belgique, principalement composé de prairies. En parallèle, une analyse sur les performances de ces aménagements en fonction des types de sols est également réalisée. Les quatre scénarios réalisés sont : la situation actuelle (Business as usual), le scénario défavorable avec une surface augmentée de cultures sarclées en maïs (Rapidly agricultural development), le keyline design avec un aménagement en fossés-butées surmonté d'une plantation de feuillus (Keyline) et le dernier reprend en plus du précédent, l'application de la technique de sous-solage (Keyline subsoiling). La modélisation hydrologique des différents aménagements du territoire est réalisée sur le logiciel MikeShe. Pour le scénario Rapidly agricultural development, le modèle montre une augmentation des quantités d'eau ruisselée et une augmentation des stocks en eau du sol durant la saison sèche, due à la faible période de végétation. Les résultats montrent une réduction du ruissellement pour le scénario Keyline, en termes de débits maximums à l'exutoire. L'aménagement en fossés-butées permet à la fois une conduite des eaux de ruissellement et une infiltration des eaux de surface. Cependant, la plantation d'arbres crée un prélèvement racinaire important de l'eau, pouvant mener à une diminution de l'activité photosynthétique. Pour ce qui est du sous-solage, des différences sont observées sur les performances entre le drainage favorable et le drainage imparfait. Les résultats à ce sujet ont montré la nécessité d'une analyse complémentaire pour confirmer leur efficacité dans des contextes variés. Cette étude démontre le potentiel prometteur de l'Hydrologie régénérative et souligne l'importance d'une approche holistique et adaptative pour sa mise en œuvre dans un contexte socio-économique.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Résumé</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 L'eau dans le paysage . . . . .	2
1.1.1 Contexte urbain . . . . .	2
1.1.2 Contexte agricole . . . . .	3
1.2 Résilience des écosystèmes agricoles . . . . .	4
1.3 Potentiel de l'Hydrologie régénérative et des keylines pour une agriculture plus résiliente . . . . .	5
1.4 Objectifs de l'étude . . . . .	9
<b>2 Matériels et Méthodes</b>	<b>10</b>
2.1 Présentation de la zone d'étude . . . . .	10
2.2 Choix du bassin hydrographique . . . . .	11
2.2.1 Analyse de sensibilité . . . . .	11
2.2.2 Présentation du sous-bassin versant . . . . .	14
2.3 Construction des scénarios et choix des aménagements . . . . .	16
2.3.1 Méthode de détermination des keylines . . . . .	18
2.3.2 Choix des aménagements . . . . .	20
2.4 Modélisation hydrologique . . . . .	23
2.4.1 Choix des méthodes et processus physique . . . . .	23
2.4.2 Données utilisées en fonction des scénarios . . . . .	26
2.4.3 Calibration et validation du modèle . . . . .	27
2.5 Analyse des résultats . . . . .	28
2.5.1 Approche événementielle . . . . .	28
2.5.2 Approche continue . . . . .	29
<b>3 Résultats</b>	<b>32</b>
3.1 Débits maximums à l'exutoire . . . . .	32
3.2 Hydrogrammes de juillet 2021 . . . . .	32
3.3 Coefficient de ruissellement . . . . .	36
3.4 Indice de connectivité . . . . .	37
3.5 Différence de jours secs cumulés . . . . .	39
3.6 Bilan hydrique sur une maille . . . . .	41
3.6.1 Scénario RAD . . . . .	41
3.6.2 Scénarios Keyline et Keyline subsoiling . . . . .	43

<b>4</b>	<b>Discussions et perspectives</b>	<b>50</b>
4.1	Performance pour l'aspect ruissellement . . . . .	50
4.2	Performance pour l'aspect sécheresse . . . . .	51
4.3	Efficacité en fonction du type de drainage du sol . . . . .	52
4.4	Perspectives d'amélioration . . . . .	54
4.4.1	Améliorations du modèle . . . . .	54
4.4.2	Perspectives de recherche . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Contribution de l'étudiant</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>Annexes</b>	<b>64</b>



# Table des figures

1.1	Représentation de l'évolution des bocages (a) Cartes de Ferraris(1770-1778), (b) Carte du dépôt de la guerre (1865-1880 (c) Orthophotos 2021 (Service public de Wallonie (SPW) : WalOnMap) . . . . .	3
1.2	Illustration de la différence entre un sol avec une bonne structure et un sol compacté (MAGDOFF & VAN ES, 2021) . . . . .	4
1.3	Paysage en keyline design ("Pour une Hydrologie régénérative", s. d.) . . . . .	6
1.4	Illustration du keyline design (PONCE-RODRÍGUEZ et al., 2021) . . . . .	7
1.5	Schéma du développement racinaire dans la zone de sous-solage à différentes profondeurs au cours du temps (SHEPARD, 2020). . . . .	8
2.1	Localisation du bassin de la Magne . . . . .	10
2.2	Pourcentage de l'occupation du sol . . . . .	11
2.3	Fomule d'ajustement du curve number avec la pente (HAWKINS et al., 2008) . . .	12
2.4	Carte du curve number (CN)IIa pour l'occupation de sol d'intérêt . . . . .	13
2.5	Sélection des 5 sous-bassins sur le bassin versant de la Magne . . . . .	14
2.6	Proportion de l'occupation du sol de la zone d'étude . . . . .	14
2.7	Occupation du sol de la zone d'étude en 2019 . . . . .	15
2.8	Carte numérique des sols de Wallonie classés selon le drainage . . . . .	16
2.9	Orthophotos 2021 montrant le passage des eaux de ruissellement . . . . .	16
2.10	Occupation du sol pour le scénario développement agricole rapide ou rapidly agricultural development (RAD) . . . . .	17
2.11	Représentation des keypoints et des keylines pour un scénario d'aménagement (YEOMANS, YEOMANS et al., 1993). . . . .	18
2.12	Représentation des topographiques index sur la zone d'étude . . . . .	19
2.13	Représentation des keylines sur la zone d'étude . . . . .	20
2.14	Illustration sur le terrain des aménagements sélectionnés (HALLIER, 2023), (a) aménagements en fossés-butées, (b) passage d'une sous-soleuse ("ECOMONTADO", s. d.). . . . .	21
2.15	Représentation de la modification de la topographie . . . . .	21
2.16	Représentation de la zone de sous-solage et de ses limitations . . . . .	22
2.17	Représentation de l'effet du sous-solage (SILVA et al., 2021) . . . . .	22
2.18	Représentation schématique des processus couverts par Mike-SHE . . . . .	24
2.19	Valeurs indice de surface foliaire ou leaf area index (LAI), profondeur racinaire ou root depth (RD), coefficient de culture (Kc) affiliées aux différents couverts végétaux (capture d'écran de MikeSHE) . . . . .	25
2.20	Sélection de 3 points d'observation pour les aménagements en Keyline ((K) pour la zone sur la keyline avec la plantation d'arbres, (F) pour la zone de fossé et (A) pour la zone en aval de la keyline) . . . . .	30
2.21	Carte numérique des sols de Wallonie et choix des zones pour effectuer le bilan simplifié . . . . .	31

3.1	Hydrogrammes des scénarios business as usual (BAU) et développement agricole rapide ou rapidly agricultural development (RAD) à l'exutoire du bassin versant sur la période du 13 au 17 juillet 2021 . . . . .	33
3.2	Hydrogrammes des scénarios business as usual (BAU) et Keyline à l'exutoire du bassin versant sur la période du 13 au 17 juillet 2021 . . . . .	34
3.3	Hydrogrammes des scénarios business as usual (BAU) et Keyline subsoiling à l'exutoire du bassin versant sur la période du 13 au 17 juillet 2021 . . . . .	35
3.4	Différence de ruissellement entre les scénarios business as usual (BAU) et RAD .	36
3.5	Différence de ruissellement entre les scénarios business as usual (BAU) et Keyline	37
3.6	Différence de ruissellement entre les scénarios business as usual (BAU) et Keyline subsoiling . . . . .	37
3.7	Indice de connectivité pour le scénario BAU . . . . .	38
3.8	Indice de connectivité pour le scénario RAD . . . . .	38
3.9	Indice de connectivité pour le scénario Keyline . . . . .	39
3.10	Indice de connectivité pour le scénario Keyline subsoiling . . . . .	39
3.11	Différence du nombre de jours consécutifs sous condition sèche entre les scénarios business as usual (BAU) et développement agricole rapide ou rapidly agricultural development (RAD) pour l'année 2018 . . . . .	40
3.12	Différence du nombre de jours consécutifs sous condition sèche entre les scénarios business as usual (BAU) et Keyline pour l'année 2018 . . . . .	40
3.13	Différence du nombre de jours consécutifs sous condition sèche entre les scénarios business as usual (BAU) et Keyline subsoiling pour l'année 2018 . . . . .	41
3.14	Bilan en eau simplifié pour le scénario RAD sur un sol à drainage favorable (point 3 de la Figure 2.21) . . . . .	42
3.15	Bilan en eau simplifié pour le scénario RAD sur un sol à drainage défavorable (point 2 de la Figure 2.21) . . . . .	43
3.16	Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage favorable (point 1 de la Figure 2.21) : sur la keyline . . . . .	44
3.17	Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage favorable (point 1 de la Figure 2.21) : dans le fossé . . . . .	45
3.18	Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage favorable (point 1 de la Figure 2.21) : zone en aval de la keyline . . .	46
3.19	Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage défavorable (point 2 de la Figure 2.21) : sur la keyline . . . . .	47
3.20	Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage défavorable (point 2 de la Figure 2.21) : dans le fossé . . . . .	48
3.21	Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage défavorable (point 2 de la Figure 2.21) : zone en aval des keylines . .	49
4.1	Photo pour illustrer les types de végétations retrouvés sur une keyline (Visite du site des alvéoles) . . . . .	52
4.2	Stock en eau des sols selon les différents types de drainage aux différents points pour l'année 2018 . . . . .	53
4.3	Flux d'évapotranspiration selon les différents types de drainage aux différents points pour l'année 2018 . . . . .	53
4.4	Représentation des aménagements discutés (a) arrêt de la keyline avant la ligne de crête, (b) renfort en butée à l'extrémité de la keyline . . . . .	55
8.1	Tableaux de valeurs pour la détermination des curve number (CN) . . . . .	64
8.2	Cartes pour la détermination du curve number (CN)IIa . . . . .	66

8.3	Droites de régression entre les débits maximums observés selon les différents scénarios . . . . .	68
8.4	Cartes des coefficients d'écoulement pour chaque scénario . . . . .	70
8.5	Cartes du nombre de jours consécutifs sous condition sèche pour chaque scénario	72

# Liste des tableaux

2.1	Tableau récapitulatif des données d'entrées et des sources . . . . .	27
2.2	Analyse des débits observés et modélisés à la station Forêt . . . . .	27
3.1	Analyse sur les débits maximums modélisés selon les différents scénarios . . . . .	32
3.2	Surface aménagée pour les différents scénarios ramenée à la surface du bassin versant . . . . .	32
3.3	Comparaison des débits à l'exutoire entre les scénarios business as usual (BAU) et RAD . . . . .	33
3.4	Comparaison des débits à l'exutoire entre les scénarios business as usual (BAU) et Keyline . . . . .	34
3.5	Comparaison des débits à l'exutoire entre les scénarios business as usual (BAU) et Keyline subsoiling . . . . .	35
8.1	Classification en 9 types d'occupation pour la détermination des curve number (CN) . . . . .	65
8.2	Valeurs choisies pour le curve number (CN)II . . . . .	65
8.3	Valeurs de indice de surface foliaire ou leaf area index (LAI), profondeur racinaire ou root depth (RD) et coefficient de culture (Kc) pour les différents types d'occupation du sol sur différentes périodes . . . . .	67
8.4	Choix des coefficients de Manning selon les différentes occupations du sol . . . . .	68

# Acronymes

**BAU** business as usual

**CNSW** carte numérique des sols de Wallonie

**CN** curve number

**CR** coefficient de ruissellement

**DHI** Institut hydrologique danois

**ET** évapotranspiration

**IRM** Institut de recherche météorologique

**Kc** coefficient de culture

**LAI** indice de surface foliaire ou leaf area index

**MNT** modèle numérique de terrain

**RAD** développement agricole rapide ou rapidly agricultural development

**RD** profondeur racinaire ou root depth

**SCS** soil conservation services

**SPW** Service public de Wallonie

**TPI** topographic position index



# Chapitre 1

## Introduction

Durant les 20 dernières années, de nombreuses études ont été menées pour tenter de prédire les impacts du changement climatique sur les ressources en eau. Dues au réchauffement climatique, certaines régions du monde risquent d’être frappées par des vagues de chaleur pouvant dépasser, selon les scénarios climatiques, les 60 jours consécutifs (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2022). De plus, l’augmentation du déficit estival, lié à la diminution des précipitations et l’augmentation de l’évapotranspiration, augmente la probabilité de sécheresse (TELLER et al., 2023). Mais les sécheresses ne sont pas le seul impact que peut avoir le climat futur. Il a un effet certain sur l’augmentation de la fréquence et de l’intensité des précipitations extrêmes en Europe (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2022). De fait, dans certaines régions du centre de l’Europe, les problèmes d’inondations risquent de poser plus de problèmes que les sécheresses. De plus, au vu de l’augmentation des surfaces imperméables en Europe (HUANG & XU, 2022), les quantités d’eau ruisselée devraient augmenter, tout comme les vitesses de transfert (de WALQUE et al., 2017).

La gestion des risques liés aux inondations et aux sécheresses est un enjeu majeur pour nos dirigeants actuels. En effet, le ruissellement et, a fortiori les inondations, ont un coût sociétal important, tant sur le plan économique, environnemental, matériel, patrimonial que psychologique. Le coût potentiel lié aux inondations à l’échelle des riverains, des agriculteurs et de la collectivité s’élevait à 1924€/an/personne pour la Vesdre en 2014 (DOGOT et al., 2014). Pour la Région wallonne, le coût des inondations de juillet 2021 s’élève à 2,8 milliards d’euros (“Inondations de juillet 2021”, s. d.). Il n’y a pas que les inondations qui sont ici en jeu. Les périodes de sécheresse ont aussi un impact sur notre société et sur les écosystèmes (convention to combat desertification (COP15), 2022). Durant le siècle dernier, des milliards de personnes ont perdu la vie en raison des sécheresses et les impacts sur la santé publique sont nombreux (SALVADOR et al., 2023). Le coût économique des sécheresses peut se traduire sous différentes formes indirectes, par exemple l’impact sur le rendement des cultures (VANONGEVAL & GOBIN, 2023) ou encore la réduction du débit d’étiage (FOLKENS et al., 2023).

Tous les secteurs d’activité sont concernés par la problématique et doivent engager une réflexion pour améliorer la gestion des eaux sur le bassin hydrographique. Le secteur agricole est l’un de ceux sur lesquels les efforts devraient se concentrer, car il offre un potentiel considérable d’amélioration en matière de gestion de l’eau. Dans le cadre de ce travail, le potentiel d’une agriculture plus résiliente et repensée de manière à limiter l’impact de ces extrêmes hydrologiques est étudié. Il existe à ce jour peu d’études quantifiant en ce sens le potentiel de l’agriculture à l’échelle d’un bassin versant. Il est pourtant nécessaire de pouvoir le quantifier, pour connaître la part de gestion des flux d’eau que pourrait reprendre l’agriculture.

Ce travail s’inscrit dans un projet plus vaste sur le bassin de la Vesdre visant à modéliser les flux hydrologiques observés durant les 20 dernières années et proposer des aménagements pour réduire l’effet du ruissellement. Ce projet de recherche a été sollicité par la Région wallonne pour quantifier l’efficacité des aménagements supposés limiter les dommages causés par de futures inondations sur la région. En effet, les inondations de juillet 2021 ont fait 38 morts et près de 100 000 personnes touchées, d’après le bilan de la commission d’enquête du parlement wallon. Ces événements, bien que dramatiques, ont permis de réaliser la nécessité d’avoir une meilleure gestion du risque en Belgique (THIRY & FALLON, 2021).

Dans le diagnostic de la Vesdre, il est clairement stipulé que pour limiter à l’avenir les risques liés aux inondations, des mesures doivent être prises, tant à l’échelle politique que sociales. Il y a une nécessité à rendre le bassin de la Vesdre plus durable via l’aménagement du territoire. Ces aménagements doivent se concentrer en amont du bassin versant, avec des dispositifs de rétention, d’infiltration et de stockage adaptés aux conditions locales (TELLER et al., 2023).

## 1.1 L’eau dans le paysage

Le ruissellement désigne l’eau s’écoulant à la surface du sol. Il désigne la part d’eau ne pouvant pas s’infiltrer directement dans le sol, que ça soit des précipitations, de la neige ou de l’irrigation. Ce mécanisme dépend du climat, de la topographie, de différentes caractéristiques du sol, de la couverture de celui-ci et des activités humaines. Les causes de ruissellement sont dès lors spécifiques au bassin étudié et à ses caractéristiques propres. Bien que le climat et les précipitations soient les facteurs prépondérants (FREY et al., 2021), nous nous concentrerons sur les caractéristiques pouvant être améliorées par une gestion adaptée du territoire.

Les sols ont un rôle important dans la régulation des flux hydrologiques. En effet, ils jouent un double rôle. Tout d’abord, leurs capacités d’infiltration permettent de contenir une partie des quantités d’eau précipitées. Cette eau peut ensuite, soit être drainée en profondeur pour la recharge des nappes phréatiques, soit être évapotranspirée. En effet, les sols sont le support de la végétation qui va contribuer au ralentissement des flux et à l’évapotranspiration. Ce second rôle est influençable à l’échelle du paysage par les pratiques agricoles et la gestion des territoires. Nous allons dans cette partie brièvement poser le cadre de l’hydrologie et du ruissellement par rapport à l’occupation des sols et les pratiques agricoles.

### 1.1.1 Contexte urbain

Dans un premier temps, nous abordons l’urbanisation des terres. Imperméabiliser les sols fait perdre les capacités d’infiltration, de stockage et de recharge du sol. Pour des besoins résidentiels et de transport, la surface agricole diminue considérablement au profit de l’urbanisation. Sur la Vesdre, une vague de construction, entre 1950 et nos jours, se concentre sur les plateaux (TELLER et al., 2023). Le positionnement de cette imperméabilisation des sols limite la retenue des eaux en amont du bassin. De plus, cette urbanisation se fait souvent dans une logique où l’eau de ruissellement doit être évacuée le plus vite possible vers l’aval. Il est dès lors raisonnable d’imaginer que le temps de concentration (inverse de la vitesse d’écoulement) du bassin versant ait diminué suite à l’intensification du taux d’urbanisation de la zone (BAUWENS et al., 2013).



### 1.1.2 Contexte agricole

Le deuxième point que nous considérons est l'organisation des parcellaires agricoles. L'arrivée de la politique agricole commune, en 1962, favorise l'agrandissement des exploitations et des parcelles pour accroître la productivité agricole. Entre 1980 et 2019, la surface moyenne d'exploitation a pratiquement triplé en Belgique (STATBEL, 2020). Ces agrandissements de parcelles allongent les longueurs de parcours, sans obstacle physique pour ralentir l'eau. On constate également une disparition et une dégradation des éléments hétérogènes du paysage, tel que les haies sur l'ensemble de l'entre-Vesdre-et-Meuse (EUGÈNE, 2023). Ces éléments structurants permettent notamment de dévier les connexions aux réseaux hydrologiques des zones habitables ou encore de servir de barrière physique limitant la vitesse d'écoulement. D'autre part, les haies supportent de multiples services, qui participent à la régulation du milieu et à la production alimentaire (VAN VOOREN et al., 2018). Le plateau de Herve, autrefois fortement bocager, laisse place à des parcelles beaucoup plus vastes (Figure 1.1). Cependant, le paysage reste relativement morcelé comparé au restant de la Belgique et la contribution des eaux de concentration des champs peut être relativisée (TELLER et al., 2023).



FIGURE 1.1 – Représentation de l'évolution des bocages (a) Cartes de Ferraris(1770-1778), (b) Carte du dépôt de la guerre (1865-1880 (c) Orthophotos 2021 (Service public de Wallonie (SPW) : WalOnMap)

Le point suivant porte sur les itinéraires agricoles. En termes d'hydrologie, les pratiques agricoles et leur intensité peuvent impacter négativement les sols et, a fortiori, les rendements de culture elles-mêmes (DELANDMETER, 2021). On observe d'ailleurs un plafond ces dernières années où l'intensification des cultures n'est plus nécessairement gage d'augmentation du rendement (**empty citation**). Nous nous concentrons sur deux pratiques ayant une marge de progression du taux d'infiltration des sols, à savoir les cultures de printemps en rang sans interculture et le labour conventionnel (BASCHÉ & DELONGE, 2019).

Les cultures de printemps laissent les sols peu couverts de mai à juin. C'est à cette période critique que les pluies de fortes intensités sont observées. L'eau s'accumule rapidement au sol et se met à ruisseler, là où, avec un couvert végétal, elle aurait pu être ralentie dans sa chute et son accumulation au sol. Pour les cultures sarclées, la couverture du sol durant la période de végétation est également assez faible et promeut le ruissellement et l'érosion des sols. Pour pallier ces phénomènes, il convient d'optimiser la couverture de sols durant la période de végétation et hors de cette période. Pour se faire, on peut implanter des cultures hivernales (ANTOLINI et al., 2020) ou des couverts d'intercultures. Ces derniers peuvent réduire considérablement le ruissellement comparé à un sol nu. Des essais de sous-semis de trèfles et de fétuques pour le maïs sont notamment à l'essai dans le cadre du projet Intell'eau. Finalement, des rouleaux antiérosifs en maïs sont également à l'essai. Cette technique consiste à créer des dépressions entre les rangs

de maïs lors du semis pour stocker temporairement l'eau et favoriser son infiltration.

Le labour, quant à lui, permet de détruire la compaction physique qui s'installe dans les couches superficielles du sol. Néanmoins, les passages répétés des machines lourdes peuvent générer une compaction du sol sous l'horizon labouré, souvent nommée « semelle de labour ». Cette zone peu épaisse, très dense et nettement moins perméable peut entraver le passage de l'eau et des racines plus en profondeur (Figure 1.2). La recherche actuelle tend à aller vers du travail réduit ou du travail du sol en profondeur (WANG et al., 2023) ou encore vers une agriculture de conservation (Peigné 2007). Bien que l'efficacité du non-labour dépende de différentes caractéristiques du sol, les scientifiques s'accordent sur son effet de diminution de ruissellement (SUN et al., 2015). D'autres techniques sont encore à l'essai comme le strip till qui consiste à travailler le sol uniquement sur la ligne de semis (BOSWELL et al., s. d.).

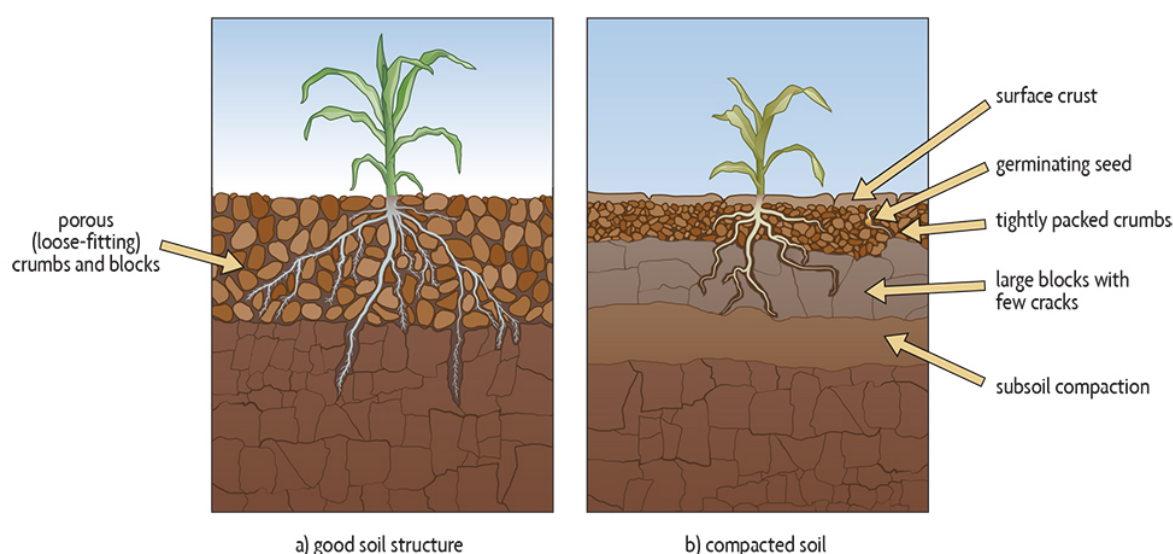


FIGURE 1.2 – Illustration de la différence entre un sol avec une bonne structure et un sol compacté (MAGDOFF & VAN ES, 2021)

Bien que les milieux herbacés permettent une réduction du ruissellement en comparaison à un sol nu (RICHET et al., 2017), certaines pratiques permettent d'augmenter le taux d'infiltration des pâtures. Notamment en combinant différentes pratiques telles que le repos prolongé, la réduction du taux de charge ou encore l'ajout de complexité dans le management de la prairie (rotation, sylviculture, multienclos) (DELONGE & BASCHE, 2018), (TEAGUE et al., 2011).

## 1.2 Résilience des écosystèmes agricoles

Finalement, nous discutons le maintien de la résilience de l'écosystème agricole face à des événements extrêmes. La résilience est un aspect crucial à considérer. Elle est définie comme "l'aptitude d'un système à surmonter une altération de son environnement ou de son fonctionnement ou à modifier son état pour garantir ou préserver les fonctionnalités du système" (RONDEUX, 2022).

En plaçant la production au cœur des choix des techniques culturales, on en oublie les autres services que l'écosystème agricole peut soutenir (THEROND & DURU, 2019). Des méthodes sont actuellement développées pour évaluer l'impact des pratiques agricoles sur la biodiversité du sol et sur la santé du sol de manière plus globale (BRAUMAN A., 2020).

Il existe une réelle opportunité d'adopter des systèmes agricoles plus autosuffisants et naturels, qui pourraient conduire à des gains significatifs sur le plan de la productivité, de l'efficacité et de la durabilité des agrosystèmes (BONAUDO et al., 2014). Pour prendre des décisions éclairées dans la gestion d'une ferme, des modèles sont disponibles pour monétariser les externalités positives de l'agriculture (MACHÁČ et al., 2021).

Face aux enjeux actuels, il est impératif de repenser certaines pratiques agricoles afin de réduire la pression sur l'environnement tout en bénéficiant des externalités positives d'une agriculture durable. Adopter une approche de gestion du paysage plus proche du fonctionnement naturel des écosystèmes, favorise l'adaptation naturelle et accroît la résilience face aux conditions extrêmes.

### **1.3 Potentiel de l'Hydrologie régénérative et des keylines pour une agriculture plus résiliente**

Quelques brèves définitions semblent de mise pour introduire cette partie. Tout d'abord, l'hydrologie est la science qui s'intéresse à tous les aspects du cycle de l'eau. Le terme « régénérative » quant à lui, fait référence à tout ce qui permet une amélioration constante d'un ensemble de facteurs environnementaux et sociaux, par une approche et un ensemble de mises en œuvre appropriées ("Pour une Hydrologie régénérative", s. d.). L'hydrologie régénérative vise la régénération des cycles d'eau douce par l'aménagement du territoire. Elle veut rassembler toutes les initiatives, le savoir-faire et les connaissances à la croisée d'un ensemble de disciplines qui sont fondamentalement respectueuses des écosystèmes.

Cela s'articule autour de 4 grands objectifs : ralentir, répartir, infiltrer et stocker les eaux de pluie et de ruissellement. Cela peut être facilement visualisé comme un budget qu'on doit optimiser. Il est dès lors nécessaire d'augmenter les entrées, limiter les sorties, agrandir les stocks et augmenter le nombre de zones de stockage. Nous allons ici reprendre ces 4 objectifs et voir les actions concrètes qui peuvent être mises en place.

- Augmenter les entrées : les précipitations ne peuvent pas être modifiées, cependant, on peut augmenter l'infiltration dans le sol. L'augmentation de la macroporosité du sol maximise les flux d'eau dans le sol. Le ralentissement des flux et leur détournement des axes de concentrations naturelles augmentent les probabilités d'infiltration sur le bassin versant. Cela peut passer par une densification de la végétation augmentant la rugosité de surface ou par des barrières physiques, bloquant l'entraînement des eaux de surfaces.
- Limiter les sorties : il peut être envisageable de limiter les flux de l'écosystème vers l'atmosphère au travers de l'évapotranspiration. Pour ce qui est de l'évaporation, on ne peut pas la modifier vu qu'elle dépend du climat local. Par rapport à la transpiration, elle peut varier par l'intermédiaire de la végétation ou l'activité enzymatique du sol. On peut dès lors augmenter le rapport de la transpiration/évaporation.
- Agrandir les stocks : en permettant une infiltration profonde, l'eau peut recharger la nappe



et augmenter le stockage d'eau dans le sol. De plus, il est aussi intéressant de jouer sur la temporalité des stocks. Un bon approvisionnement des nappes lors de la saison pluvieuse assure une plus grande disponibilité en eau pour la saison sèche.

- Augmenter les zones de stockage : en dispersant l'eau sur le bassin versant via des détournements de flux, on peut approvisionner des zones naturellement peu rechargées en eau.



FIGURE 1.3 – Paysage en keyline design (“Pour une Hydrologie régénérative”, s. d.)

La technique du keyline design (Figure 1.3), ou ligne clé en français, constitue un des précurseurs de l'hydrologie régénérative. Cette méthode de conception agricole et paysagère est initiée en Australie à la moitié du 20ème siècle par P.A. Yeomans (SHEPARD, 2020) (YEOMANS, 1954). La technique, bien que peu documentée dans la littérature scientifique (FERGUSON & LOVELL, 2014), est utilisée un peu partout dans le monde (Australie, Etats-Unies, Inde, Italie, Espagne, France) (GIAMBASTIANI et al., 2023) (GABRIELE & BRUMANA, 2023).

Les designs en keyline sont un ensemble de principes, de techniques et de systèmes qui vont permettre de coordonner le développement rural et le développement urbain, dont le but est d'optimiser la gestion de l'eau dans une ferme. La technique permet d'allier la nature existante dans le paysage et la régénération de celui-ci. La planification Keyline prend en compte la topographie naturelle du terrain et utilise sa forme pour conserver l'humidité des sols, limiter l'érosion et augmenter la fertilité des sols. La méthode met en exergue des keypoints ou points clés dans la vallée primaire, où on retrouve naturellement un débit de sédimentation. L'objectif est de profiter de ce ralentissement naturel pour détourner l'eau des axes de concentrations des flux vers les crêtes. Une ligne passant par un kepoint et suivant la courbe de niveau est appelée keyline (Figure 1.4). Plusieurs parallèles à celle-ci sont tracées créant un certain pattern. Cela permet de mieux répartir l'eau sur le bassin versant et de diriger l'eau vers des zones naturellement peu rechargées.



FIGURE 1.4 – Illustration du keyline design (PONCE-RODRÍGUEZ et al., 2021)

Les types d'aménagements retrouvés le long des keylines sont variés. En effet, la méthode met en exergue les zones où des aménagements devraient être prévus, mais la forme de ceux-ci varie fortement selon les besoins. De manière générale, la méthode peut s'inspirer d'autres types d'aménagements couramment retrouvés pour limiter le ruissellement, appelés les solutions basées sur la nature ou *natural based solutions* (DĄBROWSKA et al., 2023). On peut tout de même reprendre les grandes actions proposées pour les sols et les lignes directrices pour la conception en Keyline design :

- Infiltrer l'eau sur des lignes perpendiculaires à la pente.
- Casser les longueurs de pente, pour diminuer la vitesse des eaux ruisselées et casser l'inertie érosive de celle-ci.
- Infiltrer davantage d'eau sur le bassin en conduisant l'eau de ruissellement sur des chemins plus longs pour qu'elle ait plus de chance d'être réinfiltrée à différents endroits du paysage.
- Créer des zones de stockage de l'eau en amont du bassin, telles que des zones d'immersion (ROBERTS et al., 2023).

Une des techniques abondamment recommandées par la méthode est le sous-solage. Cette action permet d'augmenter le volume de sol exploré par les racines en permettant une meilleure pénétration du système racinaire des plantes. Ces racines verticales et profondes créent, une fois décomposées, des chemins préférentiels d'infiltration de l'eau dans le sol. Finalement, le passage d'une sous-soleuse peut permettre de détruire une éventuelle semelle de labour ayant pu se créer au fil du temps (NING et al., 2022).

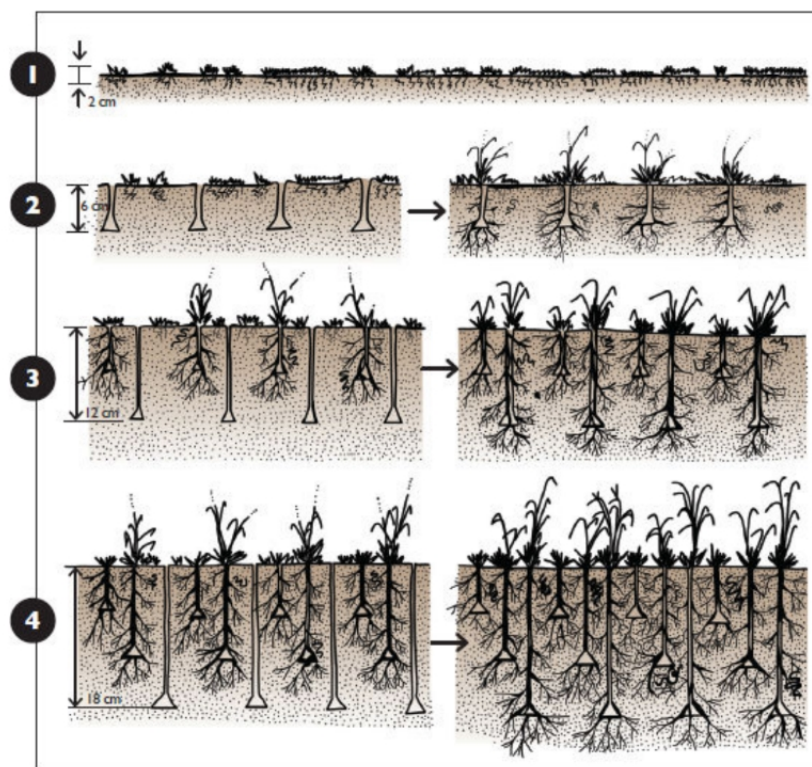


FIGURE 1.5 – Schéma du développement racinaire dans la zone de sous-solage à différentes profondeurs au cours du temps (SHEPARD, 2020).

L'opérationnalisation de la sous-soleuse n'est pas triviale. En effet, en fonction du sol sur lequel on se trouve et des conditions antérieures d'humidité, la sous-soleuse sera plus ou moins efficace. Dans des conditions trop humides de sol, le passage de machines peut créer un compactage en profondeur appelé « couche de lissage ». Il faut attendre la fin de l'été, lorsque les conditions sont suffisamment sèches, pour réaliser cette opération. D'après l'article de Ning et al. de 2022, le sous-solage obtient de bons rendements dans les situations ci-décrites : en culture de maïs avec un inter rang de 60cm, sur un sol limoneux naturellement irrigué, dans une région où la saisonnalité est marquée pour stocker de l'eau durant la saison sèche, sur des sols à pH légèrement alcalin et finalement dans des sols où la densité ou la porosité constitue un facteur limitant du développement du sol (NING et al., 2022).

Des recherches sont en cours pour améliorer l'effet des sous-soleuses. L'objectif est de diminuer les efforts de traction, limitant par la suite la consommation de fuel et la compaction des sols sous le passage des roues. Le premier facteur qui peut être amélioré est la pénétration des griffes dans le sol, en ajustant la forme (WANG et al., 2020), l'angle de pénétration, l'espacement entre les bras (HANG et al., 2018) et les vibrations (XIRUI et al., 2016). Il en ressort qu'un espacement de 400 mm entre les bras et un angle de pénétration droit ont de meilleures performances. On peut aussi avoir un monitoring sur le terrain de la profondeur des griffes en fonction de ce qui est requis (LOU et al., 2021).



## 1.4 Objectifs de l'étude

L'objectif de ce travail est de modéliser et de comparer l'effet des aménagements en keyline design sur la réponse hydrologique d'un sous-bassin versant agricole de la Vesdre. Il est dès lors nécessaire de construire une modélisation des flux hydrologiques selon différents scénarios de gestion. Un premier scénario défavorable est imaginé, suivi de deux scénarios en Keyline, avec ou sans sous-solage. Ce travail vise à quantifier le cobénéfice des aménagements en keyline design tant sur l'aspect des inondations que des sécheresses (DĄBROWSKA et al., 2023). Pour répondre à cet objectif, deux questions de recherche sont formulées :

- Quelles sont les performances des aménagements en keyline design pour la réduction des risques d'inondations et l'atténuation de la sévérité des sécheresses édaphiques ?
- Est-ce que le type de sol a un impact sur les performances des aménagements en keyline design ?

## Chapitre 2

# Matériels et Méthodes

### 2.1 Présentation de la zone d'étude

Le bassin hydrographique de la Vesdre se situe dans le nord-est de la Wallonie, en Belgique (Figure 2.1). Elle prend sa source dans les Fagnes de Steiley culminant à 605 m d'altitude et finit par se jeter dans l'Ourthe à Chênée, à 70m d'altitude. La surface de drainage est de 703 km<sup>2</sup> et la rivière parcourt 72,5 km. Les pentes moyennes des affluents de la rive gauche oscillent entre 1,75 et 3,2 %. Cette pente rend le bassin sujet au risque d'inondations dues aux fortes concentrations des flux. Elle comprend 200 affluents et sous-affluents pour un parcours total de 1417 km de cours d'eau. On y retrouve différents barrages modifiant le débit naturel du cours d'eau. La Vesdre a de nombreuses fois été confrontée à des inondations par le passé. Cependant, l'évènement de juillet 2021 est exceptionnellement rare, pour ce qui est de l'intensité de la pluie, de la durée de sollicitation du bassin ou encore de la stationnarité sur les 72h de l'averse (TELLER et al., 2023). Au vu de la sollicitation sur tout le bassin versant et pendant une longue durée, il est logique que le réseau hydrographique ait été saturé, provoquant des inondations.

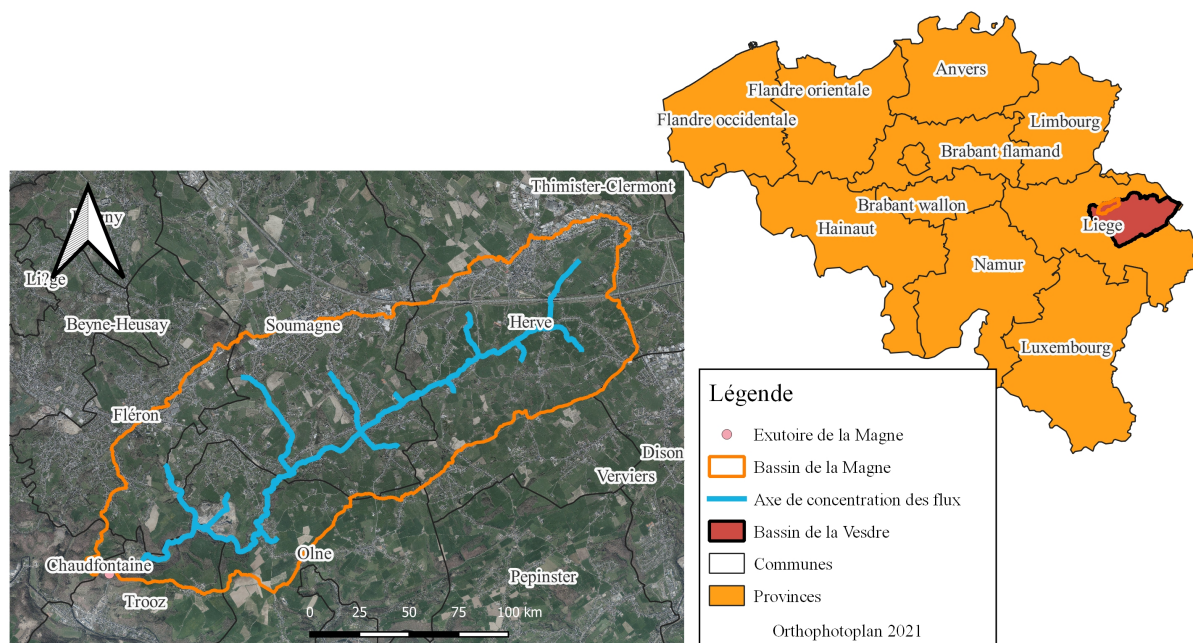


FIGURE 2.1 – Localisation du bassin de la Magne



Dans le cadre de ce travail, le sous-bassin agricole de la Magne est étudié. Sa surface est de 39,9 km<sup>2</sup> et il mesure 12km de long. La différence d'altitude est de 200m et lui confère une pente moyenne de 2% dans le réseau drainant. Le ruisseau des fonds de forêt jalonnant ce bassin prend sa source sur le Plateau de Herve et prend fin à la station L7600 (Forêt) du Service public de Wallonie (SPW). Il traverse 5 communes : Herve, Fléron, Soumagne, Olne et Trooz.

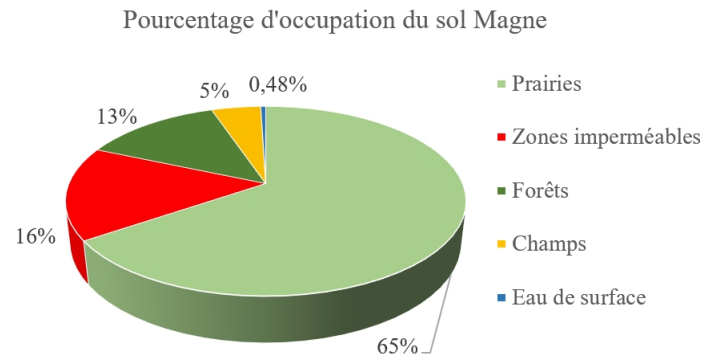


FIGURE 2.2 – Pourcentage de l'occupation du sol

La principale activité agricole retrouvée dans la zone d'étude est la production laitière (Figure 2.2) (DE CLIPPELE, 2021). On y retrouve donc des prairies pour le pâturage et quelques champs pour la culture de maïs fourrager. La couverture de sol imperméable est composée en majorité de zones résidentielles et de routes.

## 2.2 Choix du bassin hydrographique

Une sous-zone du bassin versant de la Magne est sélectionnée. Ce choix est réalisé pour modéliser avec une résolution assez fine, tout en limitant les temps de calculs du modèle.

### 2.2.1 Analyse de sensibilité

Le choix de la zone d'étude repose sur trois critères principaux. Le premier est l'opportunité. De fait, il convient de déterminer une zone où une marge d'amélioration des performances du sol est envisageable. Les sols avec les plus faibles taux d'infiltration seront préférés. Le deuxième critère repose sur la faisabilité des aménagements. Les aménagements en keyline nécessitent d'avoir un espace ouvert pour pouvoir redécouper le bassin versant. Le dernier critère tient compte de la superficie du bassin versant qui doit être supérieure à 1 km<sup>2</sup>. L'objectif de ce travail est de travailler à l'échelle du bassin versant et non de la parcelle, il est donc préférable d'avoir une surface significative d'intervention.

Pour déterminer les zones à plus fortes productions de ruissellement, une analyse de la propension à ruisseler selon la méthode de soil conservation services (soil conservation services (SCS)) est réalisé (HAWKINS et al., 2008). Cette méthode est basée sur un modèle empirique massivement utilisé dans la littérature. En effet, son utilisation est simple, les résultats sont probants pour les types de sols les plus communs et permet d'avoir une bonne approximation des eaux ruisselées sur un bassin versant relativement petit (PONCE & HAWKINS, 1996). De plus, de nombreux articles ont permis de peaufiner la méthode en affinant certains paramètres

(HAWKINS, 1993).

La première étape consiste en la détermination du curve number (CN) pour chaque pixel de la carte d'occupation du sol. Ce coefficient permet de déduire le taux d'infiltrabilité du sol. Le choix des coefficients se réalise via des tables, qui permettent de croiser différentes caractéristiques du sol (Annexe 8.1). Il est nécessaire de déterminer les conditions antérieures d'humidité, la couverture du sol, le mode d'aménagement, la condition hydrologique, le groupe hydrologique et la pente de chaque pixel concerné. Pour la couverture de sol, la carte d'utilisation et d'occupation des sols est réalisée par l'équipe du Pr. Dufrêne à Gembloux Agro-Bio Tech dans le cadre du projet de cartographie du réseau écologique wallon. La carte générée met en évidence, via un code de 5 chiffres comprenant 4 digits, la provenance des cartes. Les sources de données sont : l'utilisation du sol, le type de milieu naturel (réseau écologique) et l'occupation du sol (SPW). Un code unique est fourni reprenant la meilleure donnée disponible de chaque jeu de données pour caractériser au mieux le réseau écologique. Étant donné que pour déterminer le CN, les catégories ne sont pas exactement les mêmes que celles de cette classification, une réorganisation a permis de mettre en évidence 9 types d'occupation du sol (Annexe 8.1).

Pour ce qui est des groupes hydrologiques, la carte utilisée reprend les capacités d'infiltration des sols en Wallonie selon 4 classes : du plus drainant (A) au moins drainant (D) (LEGRAIN et al., 2011). La méthode des proches voisins est utilisée pour combler les manques de données.

Les conditions antérieures d'humidité sont considérées comme favorables pour la plupart des sols sauf pour la partie prairie, séparée en une classe favorable (jardin, parcs) et une moyennement favorable (pâturage). La raison de cette scission est d'augmenter fictivement le score d'infiltration dans les jardins et parcs, pour limiter leur sélection dans le choix de la zone. En effet, le but est de cibler des parcelles agricoles.

Finalement, le mode d'aménagement est considéré comme ordinaire pour toute la zone, étant donné qu'aucun travail de terrassement n'est présent.

Avec le croisement des différentes données récoltées jusqu'alors, il est possible de définir les différentes modalités et d'affilier à chaque pixel un CNII. En annexe 8.2 est présenté le détail des coefficients choisis sur base du tableau en annexe 8.1. Finalement, le CNII peut être ajusté à l'aide la pente au moyen de la formule ci-dessous (Figure 2.3). Pour ce faire, il est nécessaire de calculer un CNIII, dont la carte est présentée en annexe 8.2, et de réaliser la carte des pentes en pourcentage ( $\alpha$ ).

$$CN_{IIa} = (1/3)(CN_{III}-CN_{II})[1-2\exp(-13.86\alpha)] + CN_{II}$$

FIGURE 2.3 – Formule d'ajustement du curve number avec la pente (HAWKINS et al., 2008)

La Figure 2.4, reprend la carte récapitulative du CNIIa sur les zones d'intérêt de la présente étude, à savoir les prairies permanentes et les zones de culture.

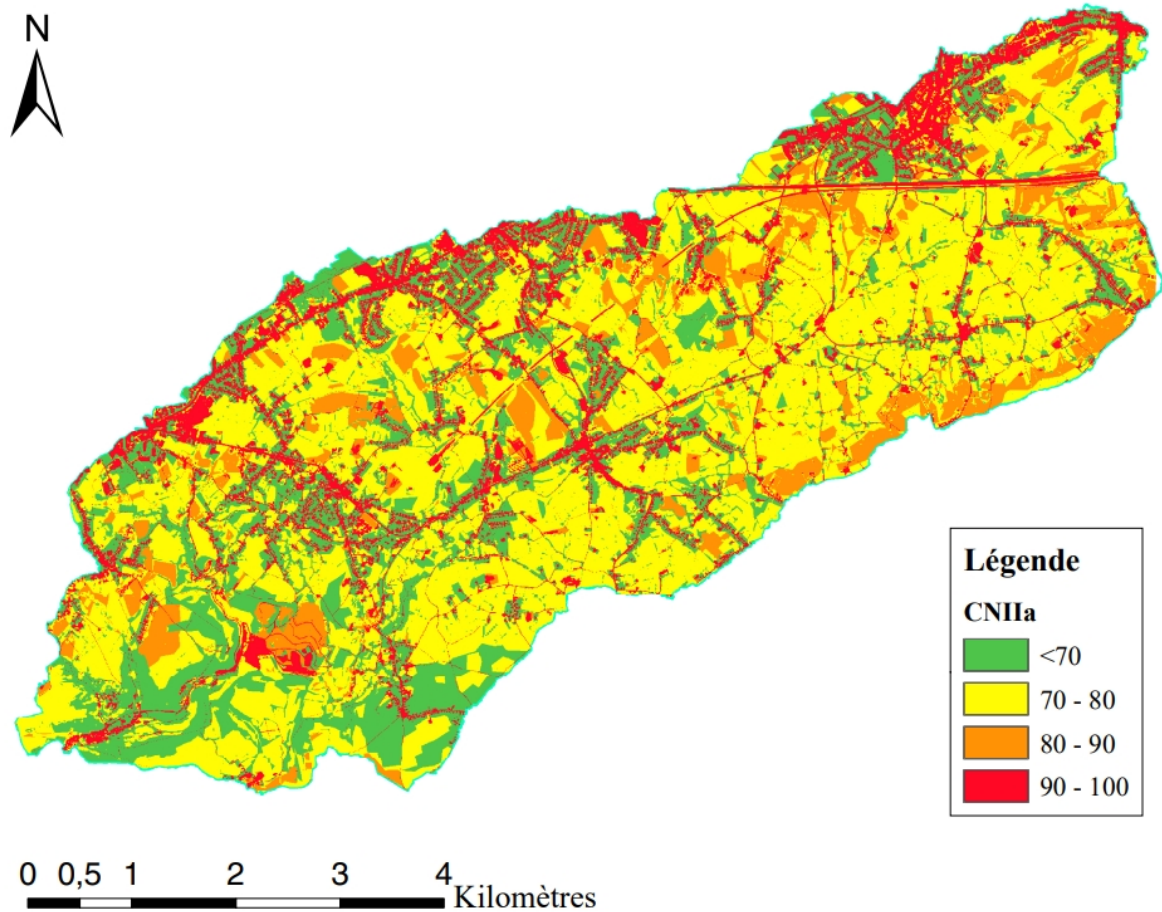


FIGURE 2.4 – Carte du CNIIa pour l’occupation de sol d’intérêt

Connaissant désormais le CN sur l’ensemble du bassin versant de la Magne, cinq sous-bassins (Figure 2.5), sont sélectionnés selon les critères suivants : aires contributives devant dépasser 1km<sup>2</sup>, une zone assez dégagée pour permettre des aménagements de type keyline et le CNIIa moyen du bassin devant être supérieur à 70. Toute la zone en aval a pu être écartée étant donné que le CN ne dépasse pas 70 pour la plupart des sols.

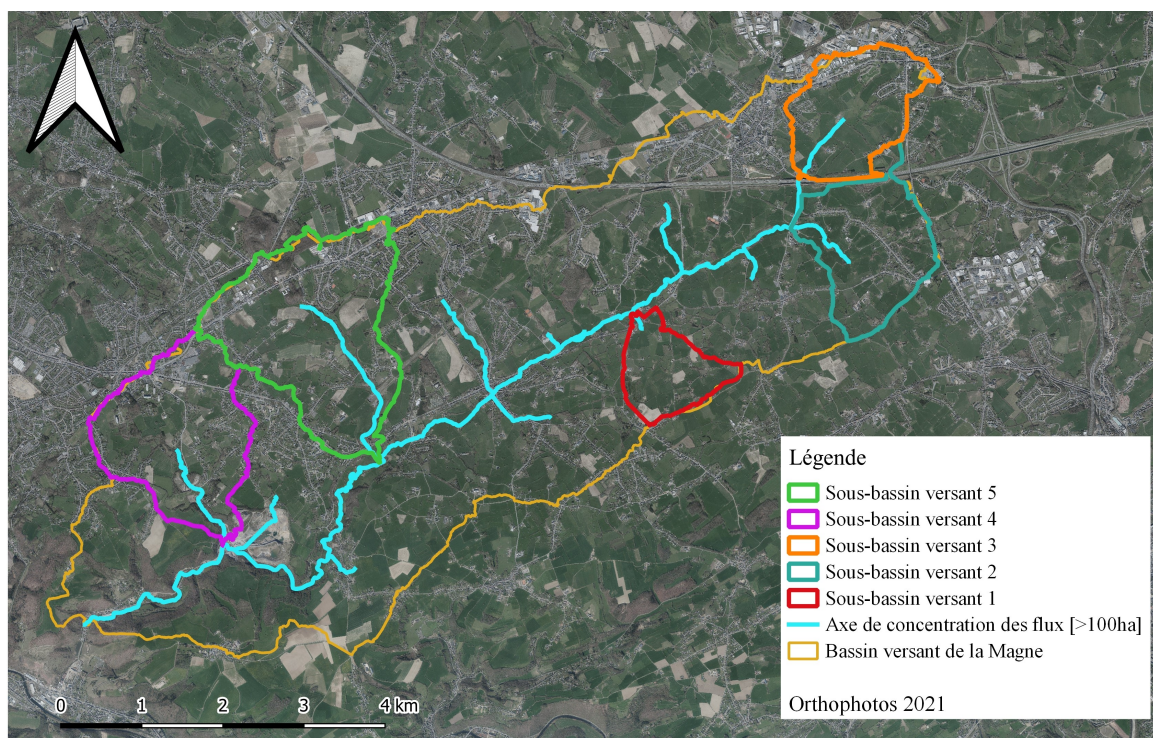


FIGURE 2.5 – Sélection des 5 sous-bassins sur le bassin versant de la Magne

Finalement, le sous-bassin 1 est sélectionné pour la facilité d'aménagement, étant donné qu'il présente un caractère plus rural que les autres.

### 2.2.2 Présentation du sous-bassin versant

Le sous-bassin se situe dans la commune de Herve à Wegimont. Les coordonnées de l'exutoire sont ( $x = 249290,5$  ;  $y = 146423,9$  en Lambert belge 72). Sa surface est de  $1,1 \text{ km}^2$  pour une longueur maximum de  $1,3 \text{ km}$ . La différence d'altitude est de  $100 \text{ m}$ , la pente s'approche donc des  $7\%$ .

Pourcentage d'occupation du sol de la zone d'étude

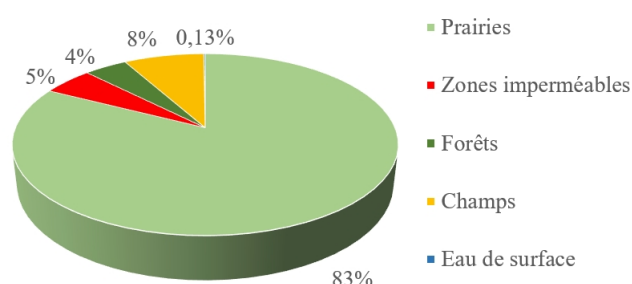


FIGURE 2.6 – Proportion de l'occupation du sol de la zone d'étude

L'occupation du sol est typique de la région. On y retrouve une forte proportion de prairies pour la production laitière (Figure 2.6 et Figure 2.7). La proportion de zones imperméables y est assez faible, et elles se concentrent sur la partie à l'est du bassin fortement morcelé. La partie ouest est quant à elle assez ouverte. Les champs de culture de maïs n'opèrent pratiquement



jamais de rotation de culture d'année en année (SPW : Sigec 2015 à 2020). On observe quelques prairies changées en culture de maïs pour une année repassant ensuite en prairies.

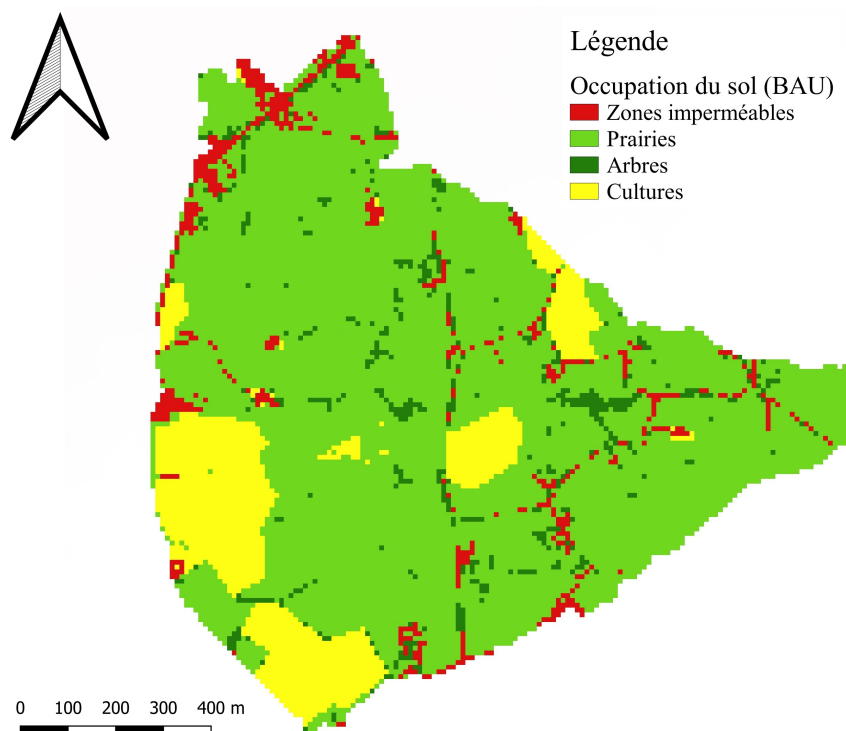


FIGURE 2.7 – Occupation du sol de la zone d'étude en 2019

Le sol de la zone est limoneux ou limono-caillouteux par endroit. Le drainage est favorable en majorité, bien qu'on retrouve des zones d'engorgement temporaire, voire permanent, le long des principaux axes de ruissellement (Figure 2.8).

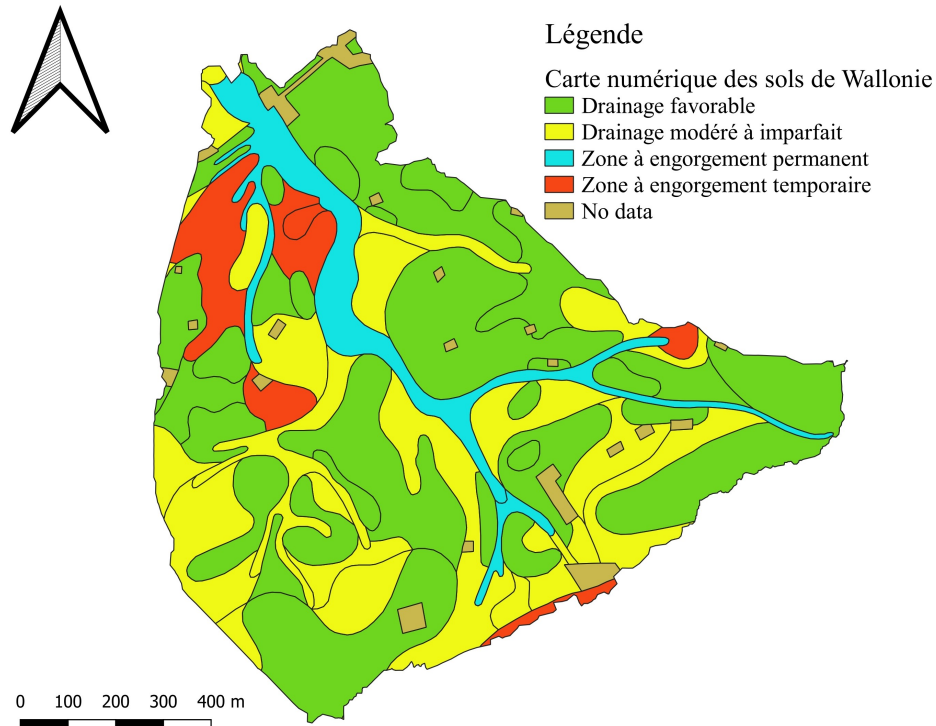


FIGURE 2.8 – Carte numérique des sols de Wallonie classés selon le drainage

Il est intéressant de noter dès à présent que sur l'orthophotos de 2021, on observe très clairement les axes d'écoulement sur une prairie au sud-ouest de la zone d'étude (Figure 2.9). Cela confirme qu'il y a des phénomènes de ruissellement sur la zone voire d'érosion des sols.



FIGURE 2.9 – Orthophotos 2021 montrant le passage des eaux de ruissellement

## 2.3 Construction des scénarios et choix des aménagements

Trois scénarios sont imaginés dans le cadre de cette étude. Il est nécessaire d'avoir des situations de comparaison pour quantifier l'efficacité des aménagements. En effet, l'objectif est de mesurer la diminution du ruissellement et la diminution des conditions de sécheresse via

les aménagements. De cette manière, le premier scénario représente la situation actuelle du sous-bassin. Il représente la situation si l'occupation du paysage actuel restait la même. C'est pourquoi il est dénommé : business as usual (BAU).

Le deuxième scénario est un scénario où certaines prairies permanentes sont remplacées par des cultures, d'où le nom de développement agricole rapide ou rapidly agricultural development (RAD) (Figure 2.10). A priori, ce scénario est défavorable par rapport à la situation actuelle d'un point de vue hydrologique. Bien que ce scénario non souhaité soit aujourd'hui peu plausible de se produire, il fut évoqué dans un passé pas si lointain. En effet, une étude, parue le 2 juillet 2021 (soit deux semaines avant les inondations), ayant pour but de relocaliser le système alimentaire de l'arrondissement de Verviers, proposait « une augmentation des superficies dévolues aux céréales dans la perspective de retrouver un équilibre entre agriculture et élevage » (DE CLIPPELE, 2021).

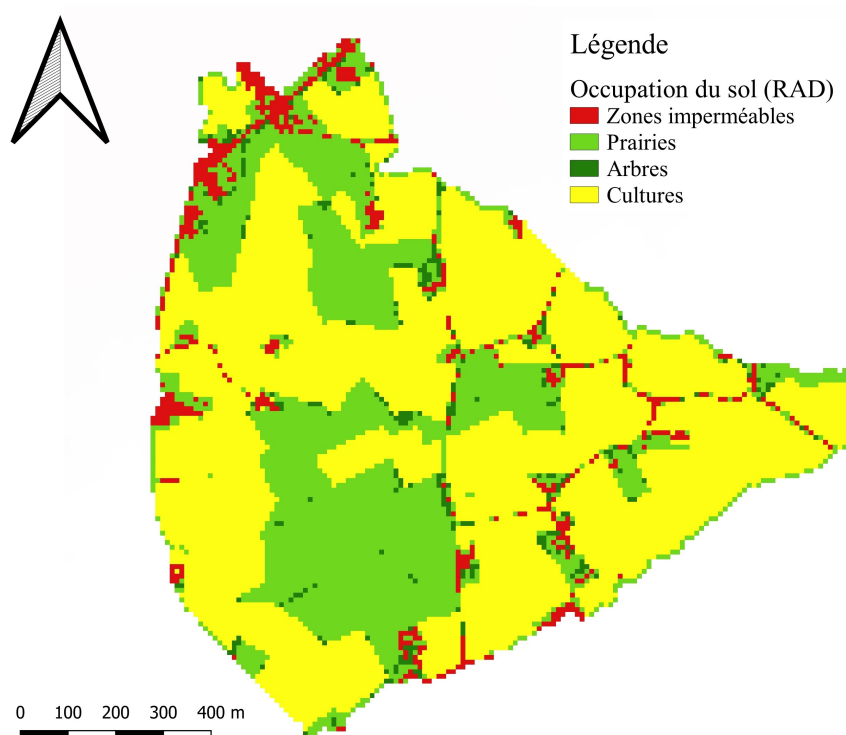


FIGURE 2.10 – Occupation du sol pour le scénario RAD

Pour la constitution de ce scénario, la carte publiée par la SPW sur la sensibilité des sols à l'érosion est utilisée. Les parcelles agricoles se sont vues attribuer différents niveaux de sensibilité à l'érosion, allant de faible à extrême (SPW : WalOnMap). Ce scénario a forcé le changement d'occupation du sol de toutes les parcelles de prairies ayant une sensibilité entre faible et moyenne à devenir des cultures de maïs. Ici, une culture de maïs à ensilage est choisie, car on la retrouve déjà sur le bassin et pour ces caractéristiques défavorables en termes de ruissellement.

Le dernier scénario constitue celui des aménagements en keyline design, avec deux variantes. Ce dernier est présenté dans un volet à part entière, étant donné qu'il a nécessité la construction de zones d'aménagements.

### 2.3.1 Méthode de détermination des keylines

La première étape est de déterminer les points-clés ou keypoints. La sélection des keypoints constitue déjà un choix dans la construction de ce scénario. En effet, les keypoints décrits par la méthode sont aux points d'inflexion lorsque la pente passe d'environ 5 % à 0 % sur une dizaine de mètres. Bien souvent, la sélection de ces points se réalise en observant l'espacement entre les courbes de niveau dans la vallée primaire comme montré à la Figure 2.11.

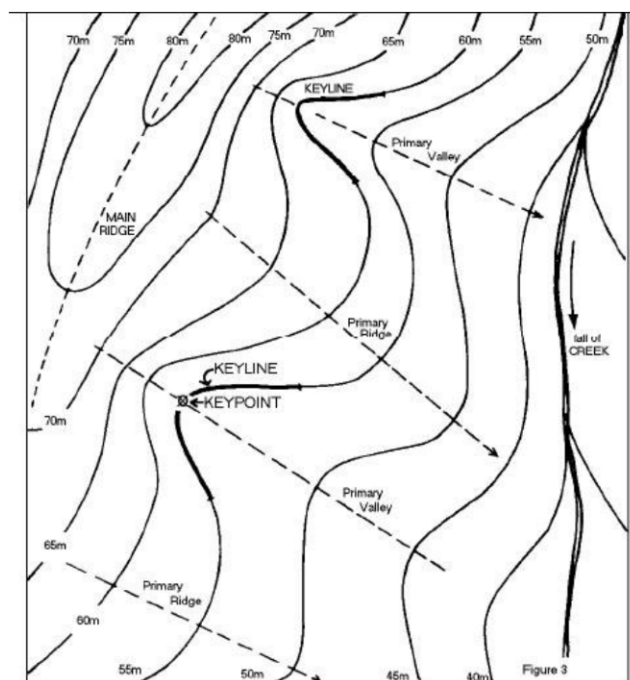


FIGURE 2.11 – Représentation des keypoints et des keylines pour un scénario d'aménagement (YEOMANS, YEOMANS et al., 1993).

Pour ce travail, une méthode de détermination des keypoints plus précise est réalisée. Étant donné que l'étude porte sur un bassin versant et non une simple vallée, plusieurs keypoints sont sélectionnés à différentes localisations. Plusieurs points sont sélectionnés afin de croiser un maximum d'axes de concentration des flux. Ce dernier est constitué via la méthode du flow accumulation en D8. La méthode prend les 8 pixels avoisinants et le plus bas en altitude accueillera le flux du pixel en question. De ce fait, chaque pixel va accumuler les pixels qui se dirigent vers lui et un score de pixels va lui être affilié. Ce score peut être facilement converti en aires contributives au ruissellement. Pour ce travail de recherche, un seuil de 10 ha de surface contributive est choisi.

Par la suite, les points d'inflexion de la pente sont mis en évidence via le topographic position index (TPI). Ce dernier renseigne la convexité ou la concavité d'un pixel au regard des pixels voisins. Les valeurs de TPI sélectionnées sont négatives, correspondant à une courbe concave et sont représentées à la Figure 2.12.



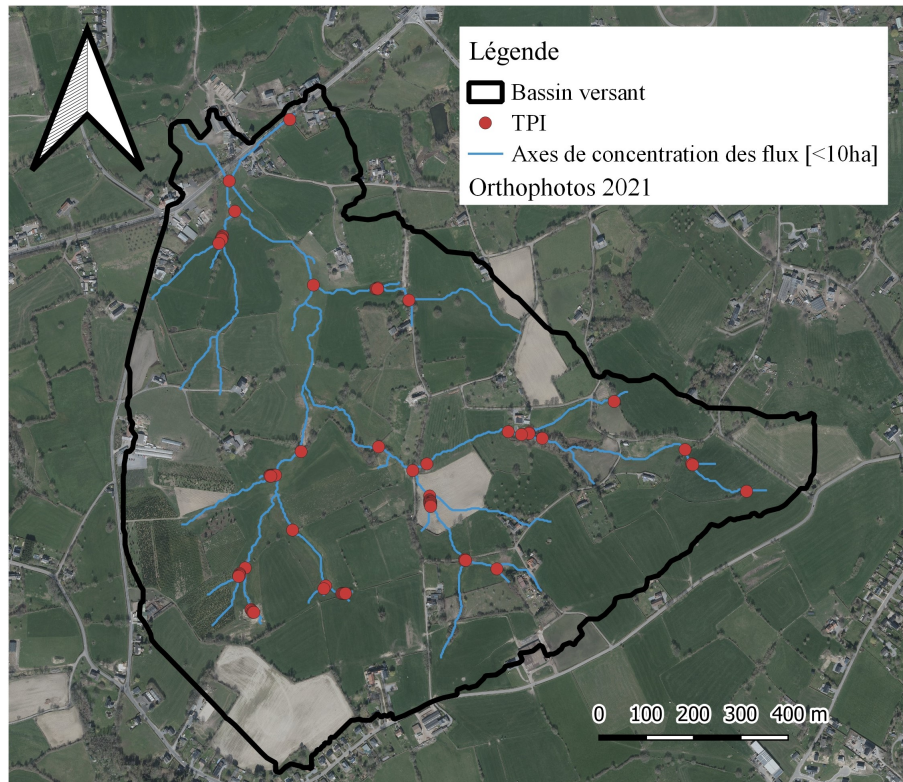


FIGURE 2.12 – Représentation des topographiques index sur la zone d'étude

Dans un second temps, sur base des keypoints, les keylines sont construites. Les keylines croisent les keypoints et s'étendent en suivant les lignes de courbes de niveau jusqu'à la ligne de crête (Figure 2.13). Les keylines descendent légèrement pour aboutir à la courbe de niveau inférieur. En effet, cela permet de créer une légère pente dans le chenal créé par le fossé. Cela permet à l'eau de s'écouler vers les zones de crêtes et de ne pas stagner au risque de s'évacuer via le réseau de drainage lors de fortes averses.

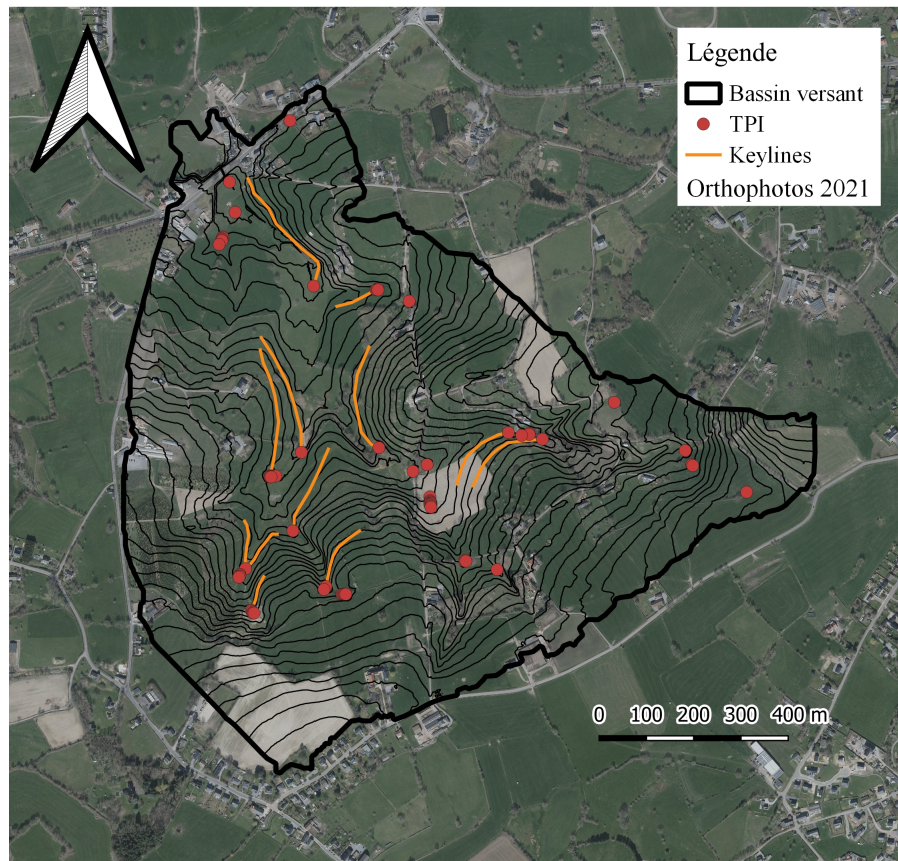


FIGURE 2.13 – Représentation des keylines sur la zone d'étude

### 2.3.2 Choix des aménagements

Les types d'aménagements sélectionnés pour le projet sont scindés en deux variantes (Figure 2.14). Une première partie consiste en des microterrassements le long des lignes-clés en ajoutant un système de fossés-butées. En aval de cette keyline, des keylines parallèles sont réalisées. Finalement, la butée est surmontée d'une plantation de feuillus ayant pour but de stabiliser et renforcer la butée pour éviter sa dégradation. Cela consiste également en un aménagement durable, car cette plantation a des répercussions positives sur différents aspects environnementaux à savoir, la séquestration de carbone, la filtration naturelle des eaux, la limitation des phénomènes érosifs et supporte la biodiversité (FAHAD et al., 2022).

L'autre variante consiste en l'ajout d'un passage d'une sous-soleuse sur la partie en aval de la ligne-clé. Il semble intéressant de séparer les deux approches, étant donné que l'une constitue une barrière physique facilement ajustable sur les données d'entrée du modèle et que la seconde comporte plus d'hypothèses sur la paramétrisation des caractéristiques hydrauliques du sol.



FIGURE 2.14 – Illustration sur le terrain des aménagements sélectionnés (HALLIER, 2023), (a) aménagements en fossés-butées, (b) passage d’une sous-soleuse (“ECOMONTADO”, s. d.).

#### A) Scénario fossés-butées

Pour le scénario Keyline, 1 m d’altitude est ajouté à tous les points passant par la ligne de keyline (Figure 2.15). Pour éviter d’avoir une discontinuité dans le maillage hydrologique, l’ajout de ces couches est forcé. C’est-à-dire que tous les pixels par lesquels passe l’axe keyline sont changés en butées. Puis, à l’aide d’outils sur Qgis, une ligne parallèle en amont est tracée et tous les points passant par cette nouvelle droite sont descendus d’un mètre. Ce choix est arbitraire, cependant, pour un pixel de 10mx10m, une différence de hauteur de 1 m semble suffisante.



FIGURE 2.15 – Représentation de la modification de la topographie

Par la suite, on détermine une résistance au ruissellement de surface dans la zone d’influence des aménagements. Cela permet d’éviter un travail fastidieux de réalisation des lignes parallèles des keylines, tout en approximant l’effet qu’elles auraient. La zone d’influence est la même que celle de la zone de sous-solage présentée à la Figure 2.16. La valeur de départ de stockage de retenue ou detention storage, est fixée à 4 mm sur tout le bassin. Cette variable interrompt l’écoulement lorsque la hauteur d’eau à la surface du sol ne dépasse pas un certain seuil. Pour illustrer, avec une valeur de 4 mm pour le stockage de retenue, les pluies engendrant une lame d’eau à la surface du sol inférieure à 4 mm de hauteur ne généreront pas d’écoulement en surface. Dans la zone en aval des keylines, la valeur est augmentée de 10 mm. Cela correspond au volume d’eau qui aurait été repris par le fossé.

#### B) Scénario sous-solage (Keyline subsoiling)

La zone où est effectué le sous-solage est en aval de la keyline principale et est limitée par les lignes de crêtes (Figure 2.16).



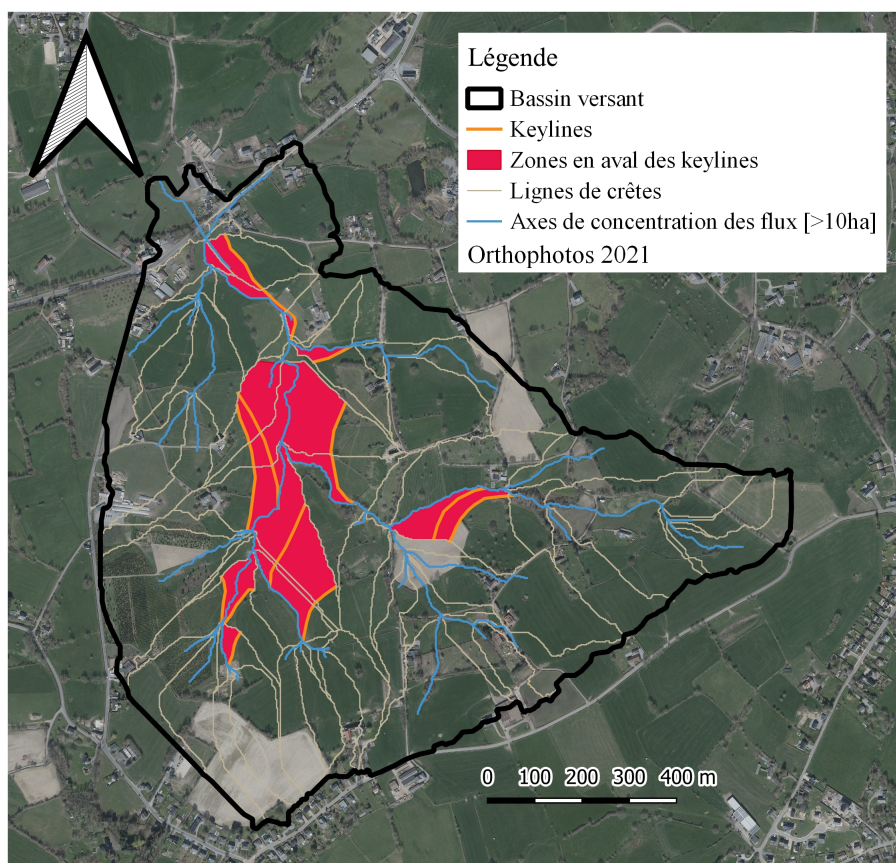


FIGURE 2.16 – Représentation de la zone de sous-solage et de ses limitations

Pour le scénario où on considère le passage d’une sous-soleuse sur 30 cm de profondeur, les propriétés hydrauliques du sol sont ajustées. Étant donné qu’il y a une augmentation de la macroporosité, la teneur en eau à saturation est augmentée ainsi que la conductivité hydraulique à saturation. On retrouve respectivement une augmentation de 10 % de la teneur en eau du sol (SILVA et al., 2021) et la conductivité à saturation est doublée (VIZITIU & CALCIU, 2022) sur les 30 premiers centimètres (Figure 2.17).

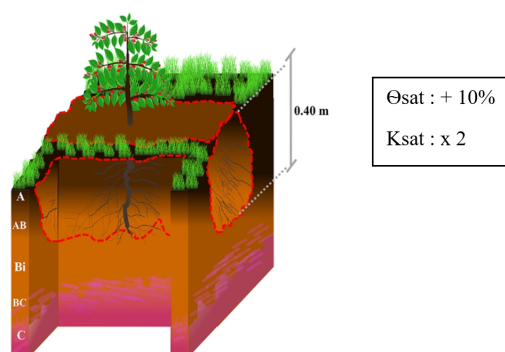


FIGURE 2.17 – Représentation de l’effet du sous-solage (SILVA et al., 2021)

## 2.4 Modélisation hydrologique

La complexité des processus générant du ruissellement ne permet pas de prédire avec certitude les quantités d'eau ruisselée (THOBER et al., 2018). C'est pourquoi, ces dernières années, de nombreux outils ont été créés pour quantifier les flux hydrologiques. Les modèles varient fortement selon les objectifs de recherche (BECKERS & DEGRE, 2011). Ici, un modèle à base physique est préféré pour sa modélisation fine des scénarios de gestion. Les modèles hydrologiques à base physique permettent d'obtenir une représentation des principaux processus du cycle hydrologique à l'échelle du bassin versant. En effet, ceux-ci proposent de meilleures performances à l'échelle du bassin versant et il s'agit de la meilleure unité pour étudier toute la complexité des systèmes terrestres en surface (CHENG & LI, 2015).

Les lois physiques régissant les différents processus, par exemple la conservation de la masse, de l'énergie et de la gravité, sont au cœur de cette modélisation. Les modèles hydrologiques à base physique sont également dits « intégrés », car ils modélisent différents compartiments du cycle hydrologique (écoulements de surfaces, dans la zone vadose et dans la zone saturée) et leurs interactions.

Dans le cadre de ce travail, le choix s'est porté sur le logiciel Mike, développé par l'Institut hydrologique danois (DHI). En effet, MIKE-SHE présente de bons résultats de par sa fonctionnalité, son applicabilité, la justesse des prédictions sur des événements extrêmes et la qualité des jeux de données en sortie (KELLER et al., 2023). Il permet de couvrir les processus hydrologiques majeurs tels que l'évapotranspiration (ET), le ruissellement de surface, les écoulements vers le réseau de drainage, les écoulements hypodermiques, les écoulements souterrains et l'interaction entre tous ces processus. Chacun des processus peut être étudié à une échelle plus ou moins fine, avec un degré de complexité de description des variables paramétrables en fonction des résultats escomptés (BUTTS et al., 2004). En effet, étant donné que le modèle est complètement distribué, la résolution ainsi que le degré de complexité des variables en entrées du modèle peuvent être ajustés selon les besoins.

En ce qui touche la résolution, les résultats des modèles obtiennent sensiblement de meilleurs résultats pour les comportements moyens et extrêmes à la sortie du bassin, lorsque la résolution du modèle est augmentée (BOOIJ, 2005). C'est pourquoi la résolution est fixée à 10mx10m dans le cadre de ce travail. Finalement, le modèle offre la possibilité de modéliser en continu, ce qui est réalisé sur une période de 6 ans, du 1er octobre 2015 jusqu'au 22 juillet 2021. Ce choix de modèle continu prend toute son importance quand on analyse des indicateurs de sécheresse.

### 2.4.1 Choix des méthodes et processus physique

Les modèles physiquement basés sont précis en ce qui touche la caractérisation des processus, cependant, ils nécessitent des données d'entrées complexes et nombreuses. En effet, pour résoudre les équations physiques, il est nécessaire d'implémenter toutes les variables explicatives. Nous allons dans cette partie expliquer les principaux processus repris par la modélisation pour mieux comprendre les besoins du modèle (Figure 2.18).

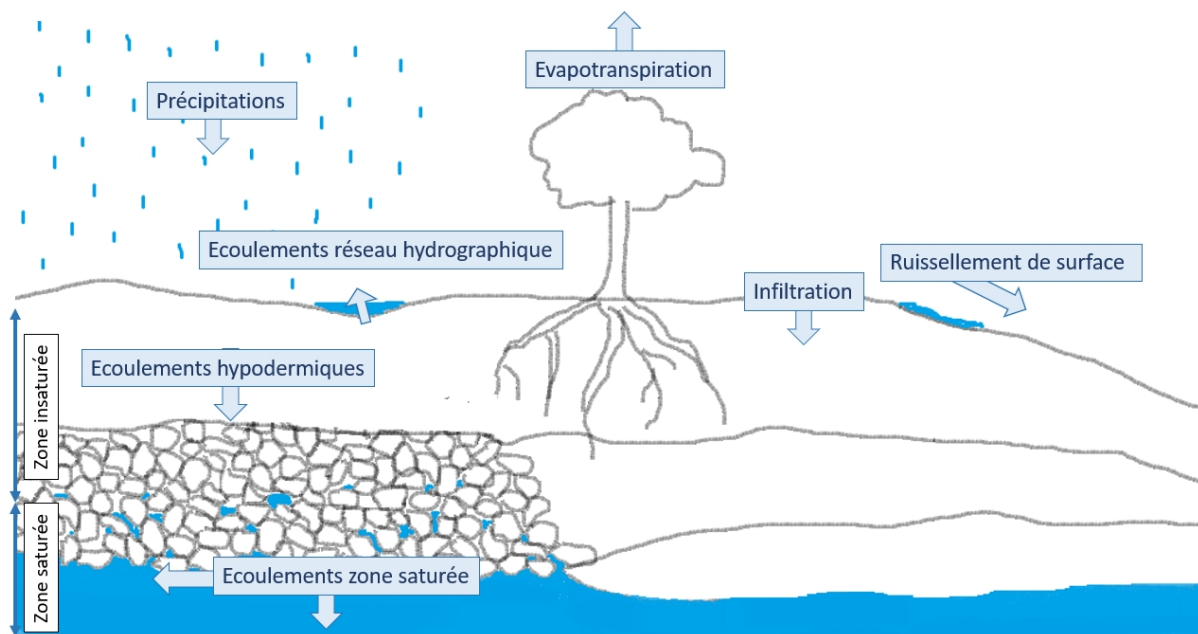


FIGURE 2.18 – Représentation schématique des processus couverts par Mike-SHE

### Précipitations et évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle est calculée par l'Institut de recherche météorologique (IRM) via la méthode de Penman-Monteith à une résolution de 5km. Elle prend en compte les températures min et max, l'humidité relative moyenne, le rayonnement solaire total et la vitesse moyenne du vent. La période du modèle est du 1er octobre 2015 jusqu'au 22 juillet 2021. Étant donné que le modèle est continu, il était intéressant pour l'analyse des résultats d'avoir un panel d'intensité et de quantité de pluviométrie variée. On observe sur la chronique deux fortes averses, une le 1er juin 2018 et celle des inondations de juillet 2021. Pour les sécheresses, une période sèche de 2 mois est identifiée entre juin et juillet 2018.

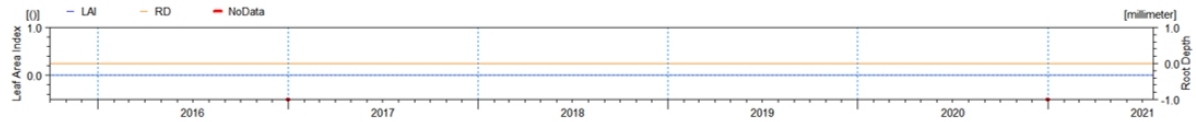
Pour les besoins du modèle, les précipitations doivent être horaires et spatialisées. Un prétraitement a dû être réalisé. Par maille, les données cumulées journalières de l'IRM sont retenues. Pour discrétiser ces données de précipitation par heure, deux pondérations sont effectuées. Tout d'abord une pondération spatiale. En effet, les données journalières sont reprises dans des mailles et sont pondérées selon l'influence des stations de mesures avoisinantes. Ensuite, pour décrire l'intensité en fonction de la journée, les données de la SPW sont mises à profit. Ainsi, le cumul de l'IRM est conservé et l'intensité des pluies a pu être ajustée à l'intensité observée sur une journée.

### Évapotranspiration réelle

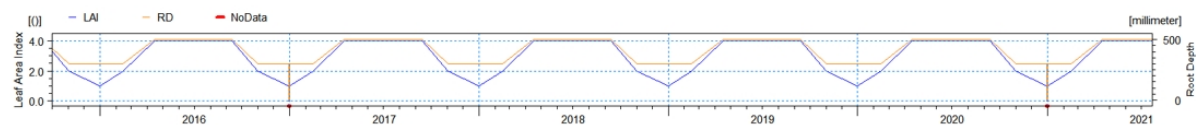
Les équations pour le modèle d'ET sont dérivées empiriquement par Kristensen et Jensen (KRISTENSEN & JENSEN, 1975). Ce modèle ajuste l'ET potentielle (calculée selon l'approche de Penman-Monteith) afin d'estimer l'ET réelle en fonction des caractéristiques de la végétation. Le indice de surface foliaire ou leaf area index (LAI) est un indicateur de la densité du couvert végétal, mesurant la surface foliaire. Il va permettre de prendre en compte l'interception, qui elle-même peut être évaporée.

Pour décrire le LAI, la profondeur racinaire ou root depth (RD) et le coefficient de culture (KC), la configuration en classement par unité végétale est choisie. Les trois informations sont reprises dans 4 classes d'occupation du sol, à savoir : imperméable, culture de maïs, prairie pâturée et forêt (Figure 2.19). La table des valeurs détaillées est en Annexe 8.3. Ces trois variables sont définies sur des échelles temporelles d'un an.

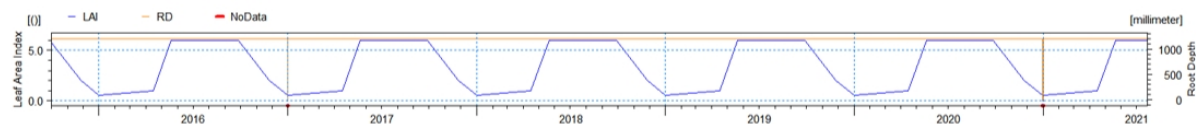
### Zones imperméables



### Prairies



### Arbres feuillus



### Cultures de maïs

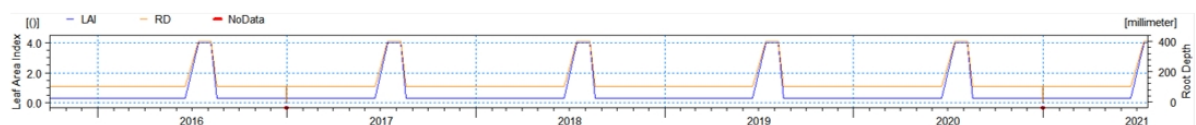


FIGURE 2.19 – Valeurs LAI, RD, KC affiliées aux différents couverts végétaux (capture d'écran de MikeSHE)

## Ruissellement de surface

Une fois que l'apport net en eau dépasse la capacité d'infiltration du sol, l'eau ruisselle. Les écoulements à la surface du sol sont décrits par une approximation des équations de St. Venant négligeant la conservation de la quantité de mouvement (STRELKOFF, 1970). Ces écoulements d'eau en surface se font des hauts vers les bas potentiels et sont donc dirigés par la topographie et la rugosité du terrain. La résistance à l'écoulement de l'eau est estimée à travers le nombre de Manning. Ce dernier est dérivé de la donnée d'occupation du sol auquel est affilié un coefficient de rugosité tiré de la littérature (Annexe 8.4). La dernière résistance à l'écoulement est stockage de retenue ou detention storage expliqué au point 2.3.2 A). Finalement, tout au long du trajet de l'eau, on retrouve également les processus d'évaporation, d'infiltration.

## Écoulement réseau hydrographique

Les écoulements dans les chenaux sont traités sur une interface appelée Mikehydro. Ce modèle hydrodynamique repose sur des équations de Barré de Saint-Venant (CUNGE & WEGNER, 1964). On le différencie des ruissellements de surface car ces derniers sont assez lents. Une fois

l'eau parvenue dans le chenal, les écoulements sont beaucoup plus rapides. Les axes d'écoulement nécessaires à l'élaboration du modèle sont identifiés via le modèle numérique de terrain (MNT) LIDAR, lui-même corrigé par le projet Lidaxes. Ces axes d'écoulements sont représentés lorsque l'aire drainée dépasse 100 hectares (figure 10).

## Écoulements hypodermique et conditions hydrogéologiques

La véritable plus-value, qui est au cœur du choix de la modélisation détaillée, est l'étude des écoulements hypodermiques. De par l'hétérogénéité des sols et la fluctuation de l'humidité, les échanges sont complexes à modéliser. L'humidité évolue de façon cyclique en fonction du réapprovisionnement, de l'évapotranspiration et des échanges vers les nappes. Une description verticale, principalement régie par la gravité, permet de décrire les flux selon l'équation de Richards dans la zone insaturée (RICHARDS, 2004). Il est par ailleurs nécessaire de connaître les propriétés de rétention et de conductivité hydraulique des sols pour la résoudre. Ces propriétés sont décrites par des fonctions mathématiques continues de Van Genuchten et Mualem (van GENUCHTEN, 1980)(MUALEM, 1986). Afin d'obtenir les courbes de rétention et de conductivité, des fonctions de pédotransfert calibrées à l'échelle européenne par Szabó et al. (2021) sont utilisées (SZABÓ et al., 2021). Elles sont ensuite appliquées aux classes texturales. La texture des sols est un croisement entre les données de drainage et la charge caillouteuse, sur base de la carte numérique des sols (SPW : carte numérique des sols de Wallonie (CNSW)). Les textures sont ensuite moyennées sur les couches allant de 0-40 cm pour l'horizon de surface et de 40-200 cm pour l'horizon sous-sol. La charge caillouteuse est notamment prise en compte pour le paramètre de la teneur en eau à la saturation en utilisant l'équation suivante :

$$\theta_{(sat-ajusté)} = \theta_{(sat)}(1 - Charge) \quad (2.1)$$

$\theta_{(sat-ajusté)}$  correspond à la teneur en eau à saturation ajustée[%],  $\theta_{sat}$  correspond à la teneur en eau à saturation [%] et la charge reprend la charge caillouteuse [%].

## Écoulements en zone saturée

En zone saturée, le modèle calcule les écoulements entièrement en trois dimensions. Les variations spatiales et temporelles de la hauteur de nappes sont régies par l'équation de Darcy. Les conductivités hydrauliques des sols à saturation sont exprimées pour les flux horizontaux et verticaux grâce au travail Catherine Sohier dans le cadre de son doctorat (SOHIER, 2011). Ce travail a pour but d'évaluer les déplacements des pollutions diffuses dans les sols et dans la zone vadose. Les flux dans la zone saturée interagissent avec les autres parties du modèle MikeSHE, en utilisant principalement les flux limites des autres composantes comme sources et puits.

### 2.4.2 Données utilisées en fonction des scénarios

Comme mentionné plus haut, la résolution des pixels de données d'entrée est fixée à 10mx10m. Cependant, toutes les données ne sont pas à cette échelle, c'est pourquoi une agrégation ajustée à la maille du modèle est réalisée pour obtenir cette même résolution. La stratégie d'agrégation est adaptée en fonction du type de données à agréger. Pour plus de clarté, le tableau 2.1 reprend les données d'entrée du modèle et les sources d'où sont prises les données.



TABLEAU 2.1 – Tableau récapitulatif des données d’entrées et des sources

Données d’entrée	Résolution	Utilisation	Source
Axes d’écoulements	2 m	En l’état	MNT LIDAR (2014)
Évapotranspiration	5 km	En l’état	IRM
Précipitation	5km	Retravaillé	IRM (journaliers) + SPW (horaires)
Occupation du sol	1 m	Reclassifié	Wal-ES
Leaf area index (LAI)	/	En l’état	Sentinel 2
Root depth (RD)	/	En l’état	Fao n°56
Coefficient cultural (Kc)	/	En l’état	Fao n°56
Texture des sols	1 m	Retravaillé	CNSW + Xavier Legrain

### 2.4.3 Calibration et validation du modèle

La zone d’étude de ce travail ne comprend pas de station de mesure de la hauteur d’eau et des débits. Ainsi, le modèle ne peut être calibré ni validé, à l’échelle de la zone d’étude. Néanmoins, une station limnimétrique en aval (à Forêt) a permis la calibration/validation d’un modèle sur un bassin versant (la Magne) plus large englobant la zone d’étude. Une légère calibration du modèle de la Magne, réalisée par l’axe eau-sol-plantes de Gembloux Agro-bio Tech, est utilisée dans ce travail. Deux variables du modèle (rugosité de surface et conductivité hydraulique du sous-sol) sont ajustées manuellement de façon à ce que les hydrogrammes de débits observés à la station Forêt, qui est l’exutoire du sous-bassin de la Magne, soient comparables aux débits modélisés par MikeSHE. La période utilisée pour la calibration du modèle s’étend de 2012 à 2021. La validation est réalisée sur cette même période étant donné la courte période des mesures. Les résultats du tableau 2.2 montrent les performances du modèle MikeSHE selon différents indicateurs. Dans l’ensemble, les résultats de la calibration sont bons sauf pour l’année 2017 qui est une anomalie.

TABLEAU 2.2 – Analyse des débits observés et modélisés à la station Forêt

Année	ME	MAE	RMSE	STDres	R	R <sup>2</sup> - Nash
2012	-0.07	0.20	0.31	0.30	81%	64%
2013	-0.03	0.17	0.32	0.32	80%	63%
2014	-0.06	0.14	0.31	0.30	88%	76%
2015	-0.07	0.17	0.28	0.27	85%	69%
2016	0.05	0.31	0.52	0.52	81%	65%
2017	-0.19	0.22	0.29	0.22	75%	-3%
2018	-0.09	0.16	0.36	0.35	93%	82%
2019	-0.09	0.17	0.30	0.28	80%	60%
2020	0.08	0.23	0.40	0.39	85%	68%
2021	0.14	0.33	1.25	1.24	87%	66%
2012-2021	-0.03	0.21	0.51	0.51	83%	68%

\*ME : erreur moyenne ; MAE : erreur moyenne absolue ; RMSE : erreur quadratique moyenne ; STDres : écart-type des résidus ; R : coefficient de corrélation ; R<sup>2</sup> - Nash : coefficient de Nash-Sutcliffe

## 2.5 Analyse des résultats

Pour rappel, le but de ce travail n'est pas d'avoir des valeurs absolues des scénarios. C'est pourquoi les analyses de résultats sont relatives entre les différents scénarios, pour mettre en lumière la marge d'amélioration du potentiel hydrologique. Les valeurs obtenues par la modélisation ne seront pas interprétées telles quelles.

Pour l'analyse des résultats, deux approches sont réalisées. Une approche par évènement ponctuel, qui va permettre de mettre en évidence la réponse du bassin lors d'un évènement pluvieux. La seconde approche reprend le potentiel hydrologique sur une série continue. Cette deuxième approche permet de montrer la différence d'humidité du sol lors de périodes plus sèches, mais aussi de mettre en évidence les flux dirigeant le cycle de l'eau douce à différents points du bassin versant.

### 2.5.1 Approche évènementielle

Pour l'observation du ruissellement, la période sélectionnée est celle des inondations de juillet 2021, qui s'étend du 13 au 17 juillet 2021. Le cumul des précipitations est de 164 mm sur les 5 jours. Il y a un risque accru d'engorgement à partir de 12,5 mm/12h/m<sup>2</sup> (WANG et al., 2023), or ici, on est en moyenne à 16,4 mm/12h/m<sup>2</sup> sur toute la période.

#### A) Débit à l'exutoire

Les données de débit à l'exutoire du bassin sont comparées entre le scénario BAU et les 3 autres scénarios. Pour se faire, une sélection des évènements pluvieux est effectuée avec un critère de 6h sans pluie pour séparer les différents évènements pluvieux. Par après, les débits maximums pour chaque évènement sont sélectionnés pour s'émanciper du décalage temporel qui pourrait apparaître dû aux aménagements. Un nuage de point est construit avec en abscisse les débits maximums avant aménagement et en ordonnée les débits maximums après aménagement. Une droite de régression est ensuite construite pour voir la réduction des débits maximums engendrée par les différents scénarios sur les différents évènements pluvieux. A la suite, un R<sup>2</sup> est calculé pour assurer de la précision de la relation construite. Cela permet de quantifier l'ordre de gain d'infiltration et de diminution du ruissellement à l'échelle du bassin versant sur une série d'évènements.

#### B) Hydrogramme

Les hydrogrammes du scénario BAU et le scénario Keyline subsoiling à l'exutoire sont construits pour l'évènement du 13 au 17 juillet 2021. Cette approche va permettre d'avoir une comparaison du comportement hydrologique du bassin versant avant et après les aménagements au cours d'une précipitation extrême. Sur base de ces hydrogrammes, trois indicateurs sont construits. Le premier est le décalage temporel entre les débits maximums observés. Le deuxième est la différence de débit maximum observé. Et le troisième est la différence de volume d'eau cumulée arrivant à l'exutoire sur tout l'évènement.

#### C) Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement (CR) est calculé sur l'évènement du 13 au 17 juillet 2021 pour chaque maille du modèle. Il est calculé comme suit :

$$R = P - (I_{ins} + I_{sat})[mm] \quad (2.2)$$

$$CR = R_{cum}/P_{cum}[mm] \quad (2.3)$$

Les flux pris en compte sont les précipitations ( $P$ ), l'infiltration dans le sol vers la zone insaturée ( $I_{ins}$ ), l'infiltration dans le sol vers la zone saturée ( $I_{sat}$ ) et le ruissellement ( $R$ ). Par la suite, le ruissellement est cumulé ( $R_{cum}$ ) et divisé par les précipitations cumulées ( $P_{cum}$ ) pour obtenir un CR. Ce coefficient simplifié permet de facilement représenter la part des précipitations non infiltrées dans le sol. À l'échelle d'un évènement pluvieux, il donne une bonne approximation des quantités d'eau ruisselée en parallèle aux quantités d'eau précipitée.

#### D) Indice de connectivité

L'indice de connectivité au réseau hydrologique est le temps de parcours d'une goutte d'eau, arrivé sur une certaine maille, jusqu'à l'exutoire. Dans le cas présent, le temps de parcours est calculé jusqu'au réseau hydrologique. En effet, les données de ce dernier sont difficilement exploitables pour cette analyse étant donné que les vitesses doivent être calculées de façon différenciée. Les résultats ne doivent pas être interprétés en tant que temps de transfert, car ils ne sont pas les valeurs réellement attendues.

Pour réaliser le calcul de cet indice, la direction d'écoulement des eaux de surface est extraite de la topographie implémentée MikeSHE pour connaître le chemin des eaux de surface. La distance parcourue par la goutte d'eau est la somme de chaque passage dans un pixel. En fonction de la direction d'écoulement, on somme la largeur ou la diagonale du pixel. Une fois le parcours élaboré, les vitesses moyennes journalières sur l'évènement de juillet 2021 sont extraites pour chaque maille. L'indice de connectivité est la somme de tous les temps de transition vers un autre pixel, à savoir, la multiplication des vitesses par les distances pour chaque maille.

#### 2.5.2 Approche continue

Le cumul sur l'année est de 743 mm/an, ce qui est inférieur à la moyenne annuelle de 950 mm/an pour les années entre 2010 à 2021. La période la plus sèche s'étend du 2 juin au 1er août avec un cumul de 22 mm. On remarque également une pluie de forte intensité le 1er juin avec un cumul sur la journée de 27 mm.

#### A) Différence de jours secs cumulés

Le nombre de jours cumulés consécutifs de condition sèche est calculé pour chaque scénario sur l'année 2018. Les conditions de sécheresse sont déterminées tel que la teneur en eau sur une profondeur de 30 cm de sol ne dépasse pas la réserve facilement extractible pour les plantes, fixées à -30 m de pression hydrostatique. Par la suite, la différence entre le scénario BAU et les autres scénarios sont calculés. On peut ainsi mettre en exergue l'augmentation ou la diminution du nombre de jours consécutifs de sécheresse sur l'année 2018.

## B) Bilan hydrique sur une maille

Une analyse simplifiée du bilan en eau sur plusieurs saisons au cours de l'année 2018 est réalisée pour chaque scénario. Ces résultats vont permettre une meilleure compréhension des processus impactant les flux et les stocks en eau du sol. En effet, la temporalité est un point-clé dans l'analyse des périodes de sécheresse. Deux zones avec un type de drainage différent, à savoir, drainage favorable et drainage modéré à imparfait (drainage défavorable) sont sélectionnés. Pour chaque zone, 3 points sont sélectionnés pour se retrouver respectivement sur un pixel de butée, de fossé et dans la zone en aval de la keyline (Figure 2.20).



FIGURE 2.20 – Sélection de 3 points d'observation pour les aménagements en Keyline ((K) pour la zone sur la keyline avec la plantation d'arbres, (F) pour la zone de fossé et (A) pour la zone en aval de la keyline)

Les flux analysés comprennent l'infiltration, l'ET et la recharge vers la nappe déterminée au-delà d'une profondeur de 122 cm. Finalement, la quantité d'eau dans le profil de sol est calculée pour voir son évolution. L'analyse du bilan est effectuée en fonction du Scénario BAU.

Le bilan simplifié sera réalisé au point 1 de la Figure 2.21 pour le scénario Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage favorable. Au point 2 de la Figure 2.21, le bilan simplifié sera réalisé pour les 3 scénarios en drainage modéré à imparfait. Pour le scénario maïs sous drainage favorable, la maille sélectionnée est le point 3 de la Figure 2.21.

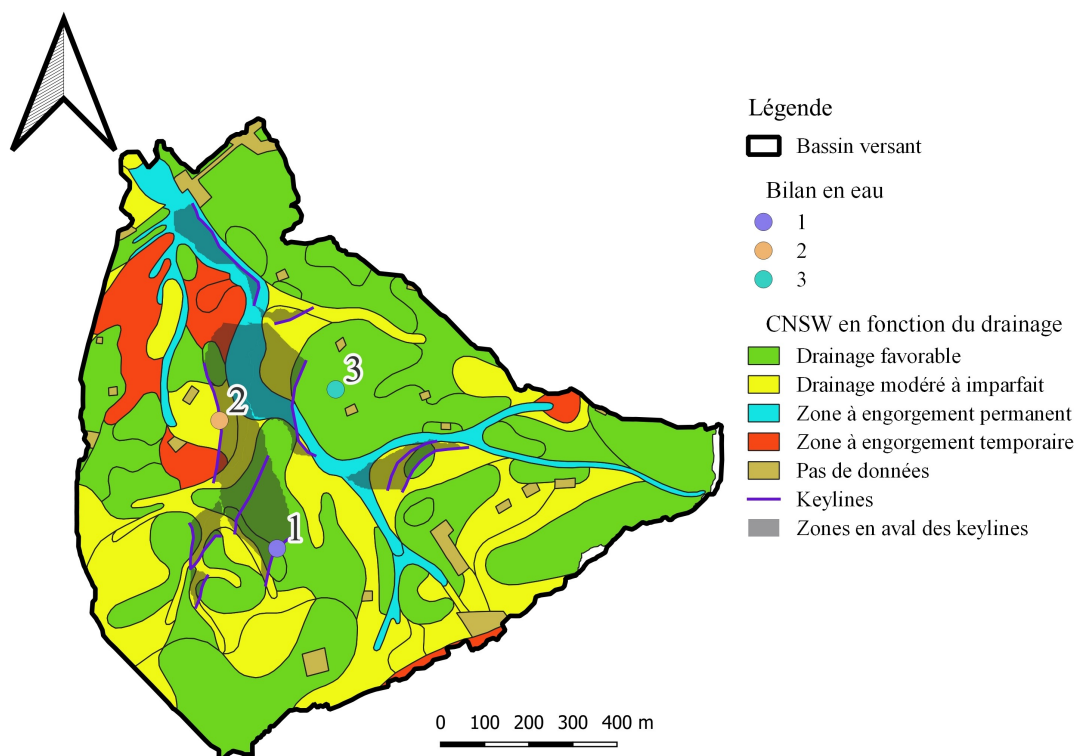


FIGURE 2.21 – Carte numérique des sols de Wallonie et choix des zones pour effectuer le bilan simplifié

## Chapitre 3

# Résultats

### 3.1 Débits maximums à l'exutoire

Dans le tableau 3.1, on trouve les pentes des droites de régression pour les débits maximums observés à l'exutoire selon les différents scénarios. En Annexe 8.3 sont présentés les graphiques.

TABLEAU 3.1 – Analyse sur les débits maximums modélisés selon les différents scénarios

Scénario	Pente de la droite de régression	R <sup>2</sup>
BAU/RAD	1,48	0,71
BAU/Keyline	0,88	0,98
BAU/Keyline avec sous-solage	0,86	0,98

L'augmentation des débits maximums observés avec le scénario RAD est pratiquement de 50 %. Ces résultats doivent être mis en perspective par rapport à la surface aménagée. En effet, la surface d'aménagements en maïs correspond à 50 % de la surface du BV (Figure 2.10), en plus des champs de maïs préexistants.

TABLEAU 3.2 – Surface aménagée pour les différents scénarios ramenée à la surface du bassin versant

Scénario	RAD	Keyline	Keyline subsoiling
Surface d'aménagement [m <sup>2</sup> ]	564 300	23 700	109 000
Rapport à la surface total [%]	49	2	9,5

La réduction des débits maximums observés est de 12 % pour le scénario Keyline et de 14 % pour le scénario Keyline subsoiling. Il y a donc bien un effet sur la production de ruissellement à l'échelle du bassin versant.

### 3.2 Hydrogrammes de juillet 2021

Pour le scénario BAU et RAD, on observe que le débit maximum est augmenté de 41 % et le volume total arrivant à l'exutoire est de 8 % supérieur. Ces résultats, pour la crue de juillet 2021, confirment les observations faites sur la régression de plusieurs événements pluvieux (Tableau 3.1). Finalement, le débit maximum de la crue pour le scénario RAD arrive 45 min avant le débit maximum pour le scénario BAU.

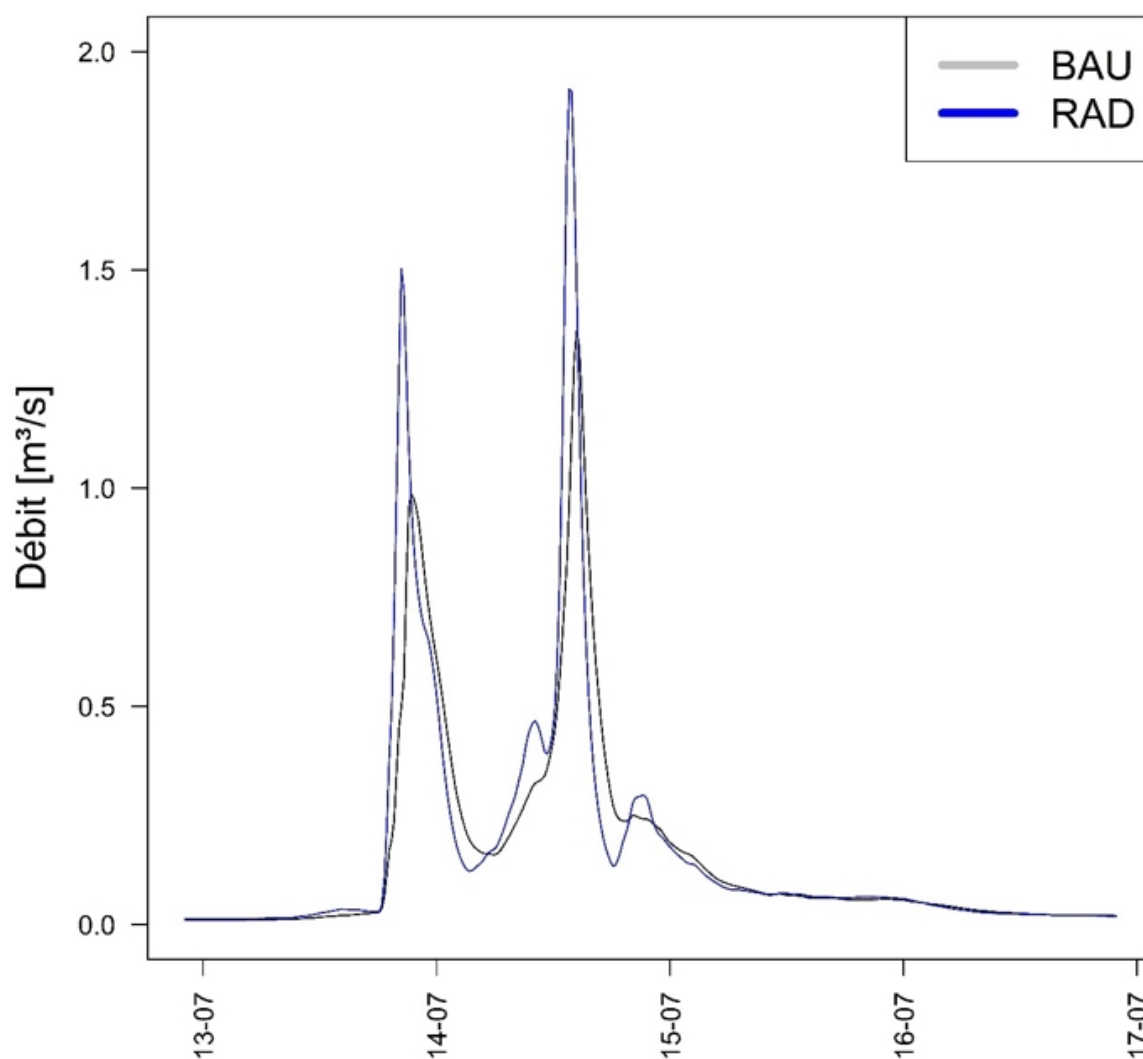


FIGURE 3.1 – Hydrographes des scénarios BAU et RAD à l'exutoire du bassin versant sur la période du 13 au 17 juillet 2021

TABEAU 3.3 – Comparaison des débits à l'exutoire entre les scénarios BAU et RAD

	Débit max [%]	Décalage temporel [min]	Volumes totales
Différence : RAD - BAU	41	-45	8

Pour le scénario BAU et Keyline, il y a une réduction de 13 % sur la hauteur du pic de crue et une réduction de 4 % du volume d'eau totale arrivant à l'exutoire. Le décalage temporel est inférieur à 15min.

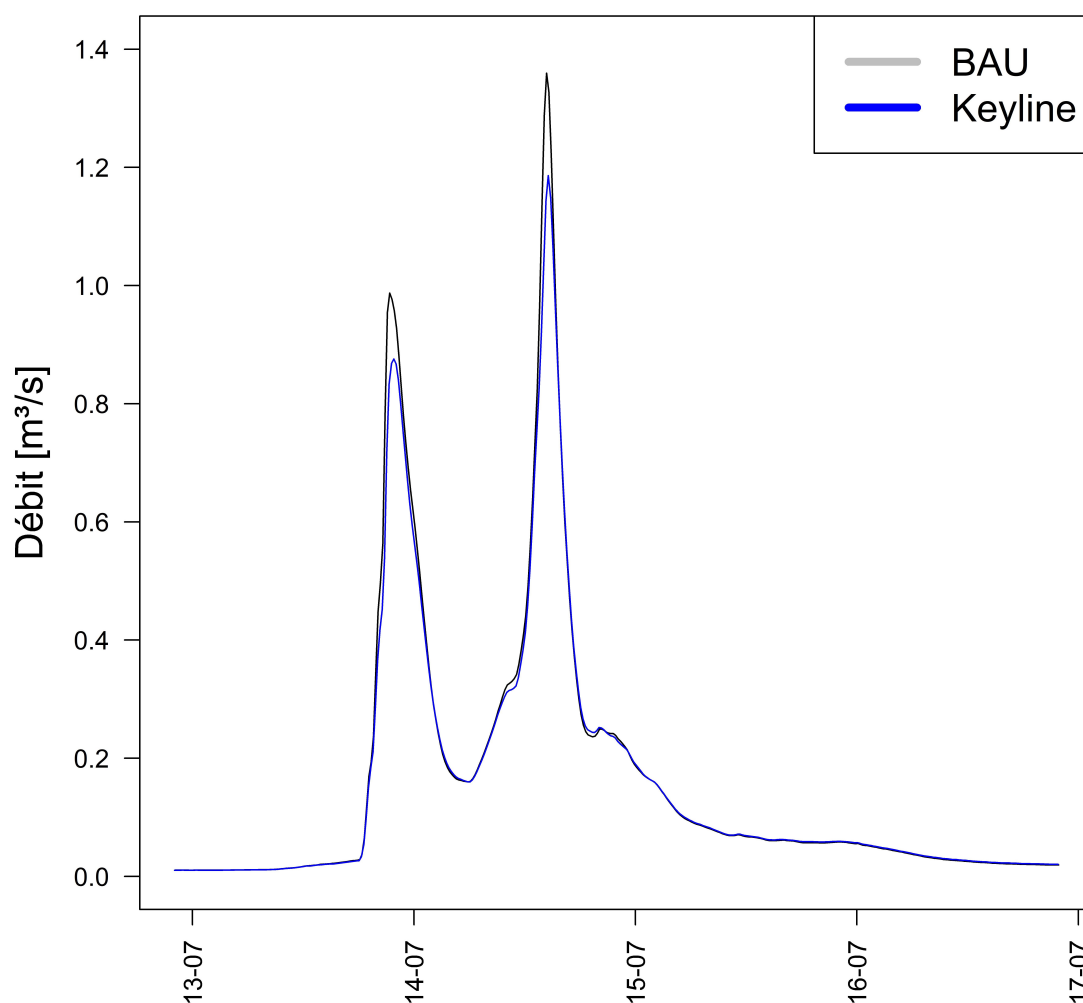


FIGURE 3.2 – Hydrogrammes des scénarios BAU et Keyline à l'exutoire du bassin versant sur la période du 13 au 17 juillet 2021

TABLEAU 3.4 – Comparaison des débits à l'exutoire entre les scénarios BAU et Keyline

	Débit max [%]	Décalage temporel [min]	Volumes totales
Différence : Keyline - BAU	-13	<15	-4

Pour les scénarios BAU et Keyline subsoiling, l'hydrogramme à la figure 3.3 montre la même tendance pour le scénario Keyline. Il y a une réduction de 15 % sur la hauteur du pic de crue et une réduction de 5 % du volume d'eau totale arrivant à l'exutoire. Un léger décalage temporel est visible, cependant il reste inférieur à quinze minutes.



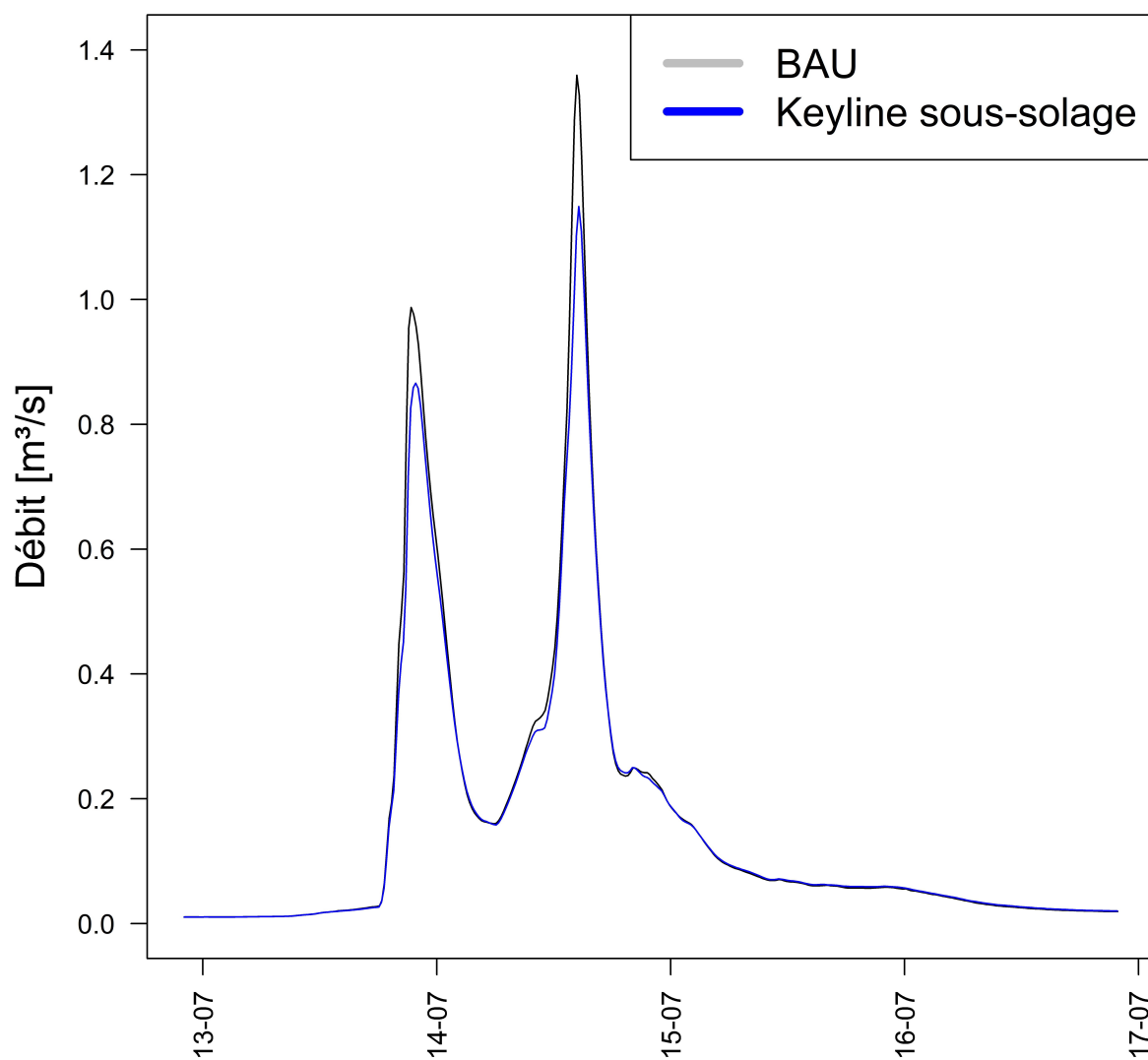


FIGURE 3.3 – Hydrogrammes des scénarios BAU et Keyline subsoiling à l'exutoire du bassin versant sur la période du 13 au 17 juillet 2021

TABLEAU 3.5 – Comparaison des débits à l'exutoire entre les scénarios BAU et Keyline subsoiling

	Débit max [%]	Décalage temporel [min]	Volumes totales
Keyline subsoiling - BAU	-15	<15	-5

### 3.3 Coefficient de ruissellement

La production de ruissellement sur le bassin versant dans le scénario RAD augmente par rapport au scénario BAU. Ces observations sont en adéquation avec les premiers résultats, bien qu'on observe tout de même une zone où le ruissellement est réduit (Figure 3.4, Zone A). En observant la carte de l'occupation du sol, on constate que les zones où il y a le plus de production de ruissellement sont les flancs où on retrouvait initialement de la prairie (Figure 3.4, Zone B). Ensuite, plus en amont, la disparition du petit massif d'arbres augmente également le ruissellement (Figure 3.4, Zone C).

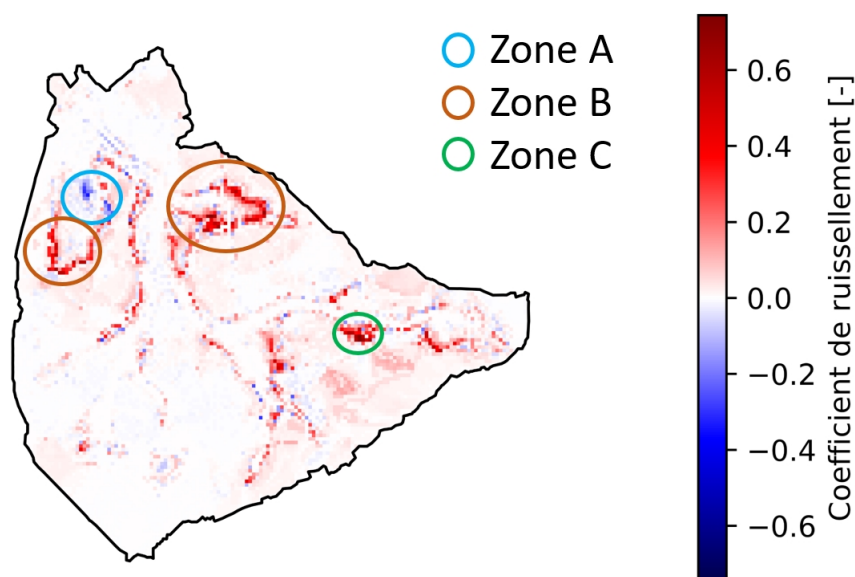


FIGURE 3.4 – Différence de ruissellement entre les scénarios BAU et RAD

Pour ce qui est du scénario Keyline par rapport au BAU (Figure 3.5), on observe deux phénomènes sur les aménagements. Le premier est la réduction du ruissellement sur les keylines, correspondant aux butées avec l'alignement d'arbres. À côté de ça, on retrouve une production de ruissellement plus importante dans les fossés. Comme expliqué plus tôt, les keylines sont construites avec une légère pente pour permettre à l'eau de s'écouler vers les zones de crêtes.

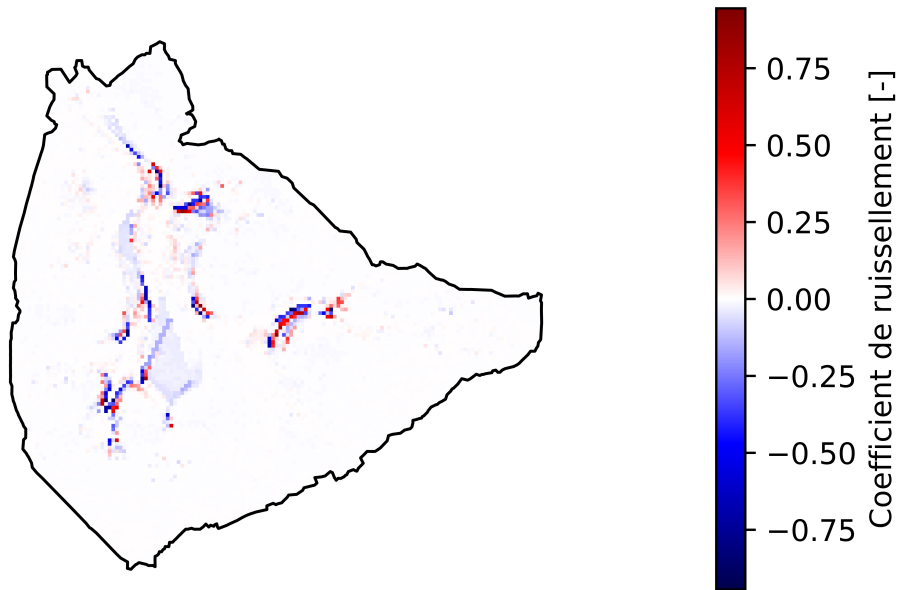


FIGURE 3.5 – Différence de ruissellement entre les scénarios BAU et Keyline

Finalement pour ce qui est du scénario Keyline subsoiling (Figure 3.6), on observe dans la zone de sous-solage, une augmentation de l'infiltration. Il est intéressant de remarquer que ce phénomène est déjà visible dans la comparaison précédente (BAU et Keyline) due au stockage de retenue. Cet effet est amplifié avec l'effet du sous-solage.

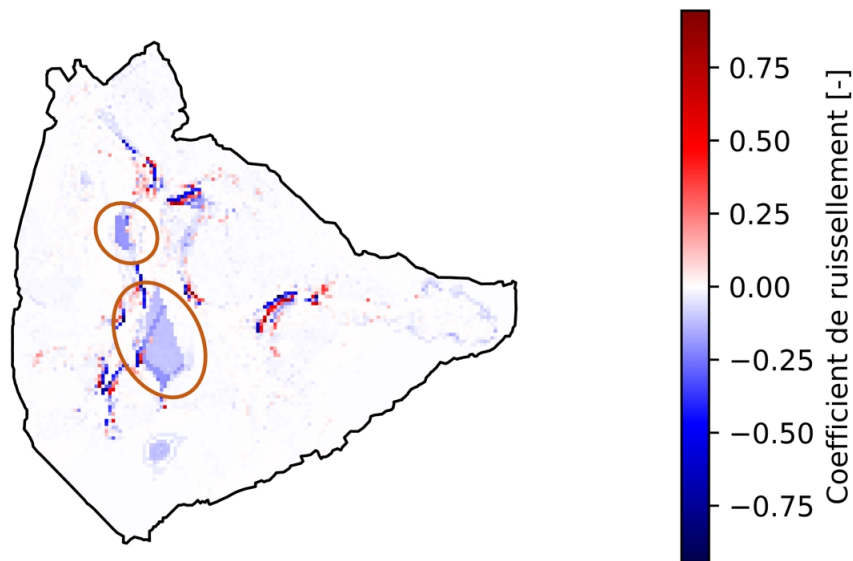


FIGURE 3.6 – Différence de ruissellement entre les scénarios BAU et Keyline subsoiling

### 3.4 Indice de connectivité

Dans cette partie, les échelles sont toujours les mêmes pour pouvoir apprécier la différence d'indice de connectivité. Pour rappel, ces cartes ne doivent pas être interprétées dans l'absolu, c'est pourquoi les échelles sont sans unité. On observe une nette différence de connectivité entre le scénario BAU (Figure 3.7) et RAD (Figure 3.8). Dans le scénario RAD, l'eau s'écoule plus rapidement pour arriver à l'exutoire. Cela provoque un décalage temporel où le pic de crue

arrive plus tôt, ce qui confirme l'observation faite au point précédent (Figure 3.1).

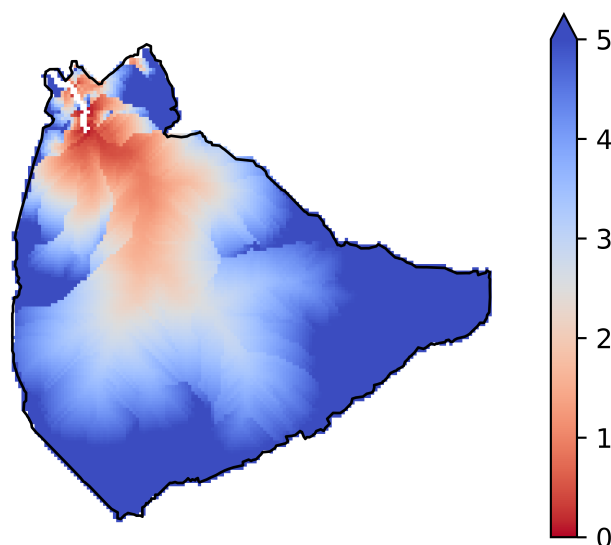


FIGURE 3.7 – Indice de connectivité pour le scénario BAU

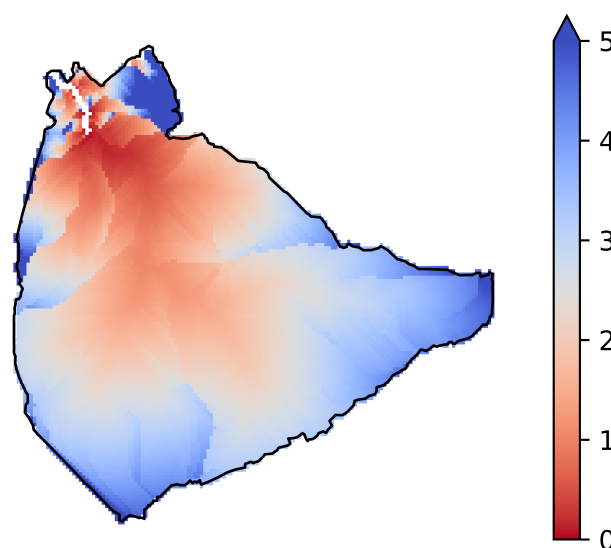


FIGURE 3.8 – Indice de connectivité pour le scénario RAD

La carte de l'indice de connectivité pour le scénario Keyline (Figure 3.9), montre une ré-organisation spatiale autour des deux keylines en aval. Les zones en amont des keylines ont des valeurs de connectivité bien plus grandes. Cela montre que les eaux sont reprises par les aménagements et ont plus de difficulté à aboutir à l'exutoire.

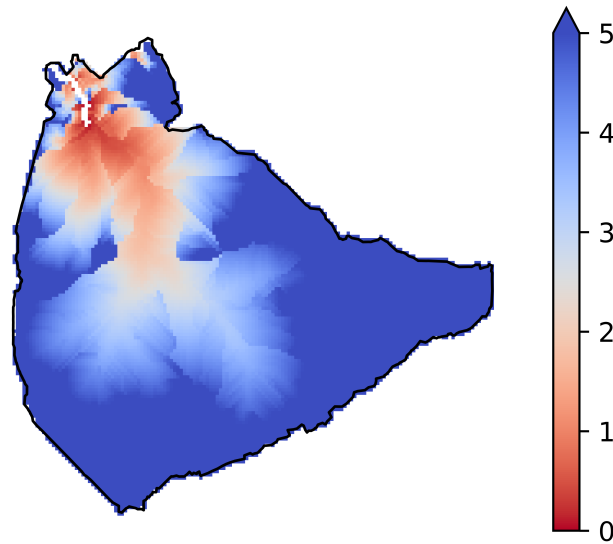


FIGURE 3.9 – Indice de connectivité pour le scénario Keyline

A la Figure 3.10, on retrouve l'indice de connectivité pour le scénario Keyline subsoiling. Il n'y a pratiquement aucune différence avec le scénario Keyline seul. En effet, le sous-solage n'a pas pour but de dévier les flux d'eau ou de les ralentir, mais bien d'infiltrer, c'est pourquoi il n'y a pas de différence marquée. Il y a probablement un effet sur le ralentissement des eaux de ruissellement, il n'est néanmoins pas visible ici.

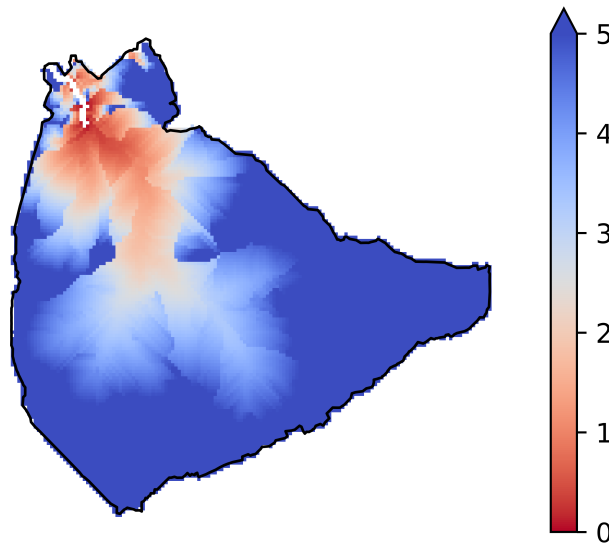


FIGURE 3.10 – Indice de connectivité pour le scénario Keyline subsoiling

### 3.5 Différence de jours secs cumulés

On observe, pour le scénario maïs (Figure 3.11), une diminution du nombre consécutif de jours dépassant les conditions de sécheresse choisies, à savoir -30m de pression hydrostatique sur les 30 premiers cm de sol. Cela s'explique par le changement de végétation sur le bassin. En effet, le maïs, ici représenté uniquement en culture d'été, va beaucoup moins transpirer que le pâturage dont le couvert transpire toute l'année (Figure 2.19 : LAI).

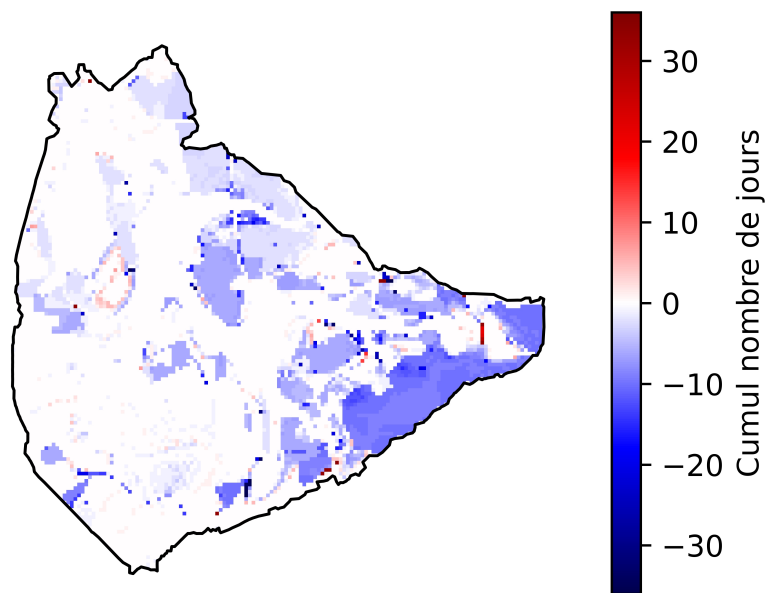


FIGURE 3.11 – Différence du nombre de jours consécutifs sous condition sèche entre les scénarios BAU et RAD pour l'année 2018

La différence du nombre de jours consécutifs sous condition sèche pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sont présentés respectivement à la Figure 3.12 et à la Figure 3.13. On observe une augmentation du nombre jours consécutifs en condition de sécheresse sur le tracé des keylines. Cela s'explique par la transpiration des arbres plantés sur ces lignes. On observe également une légère diminution du nombre de jours dans certaines zones de fossés. En effet, l'eau pouvant stagner et s'infiltrer après un événement pluvieux expliquerait que les sols s'assécheraient moins vite.

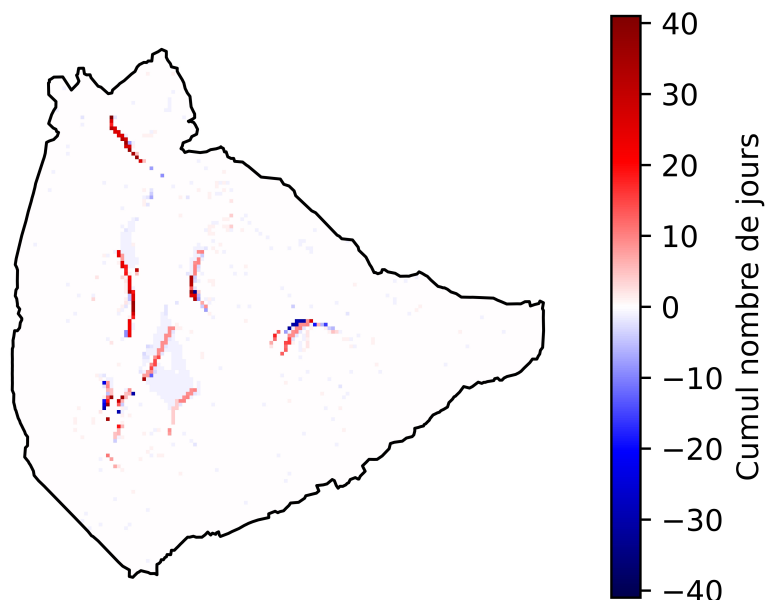


FIGURE 3.12 – Différence du nombre de jours consécutifs sous condition sèche entre les scénarios BAU et Keyline pour l'année 2018

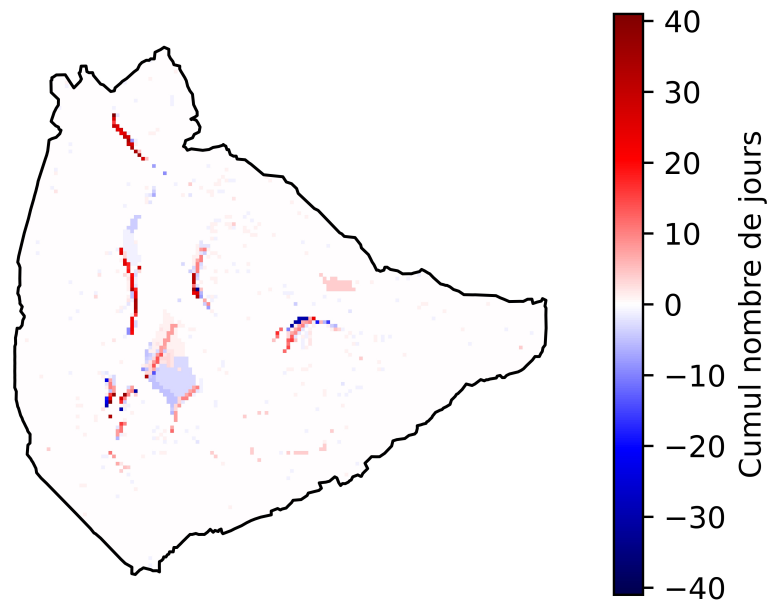


FIGURE 3.13 – Différence du nombre de jours consécutifs sous condition sèche entre les scénarios BAU et Keyline subsoiling pour l'année 2018

Finalement pour ce qui est du scénario Keyline subsoiling, très peu de différences sont observées par rapport au scénario Keyline. Il est tout de même intéressant de noter l'apparition des pixels roses en amont des keylines. Pour ces zones, le nombre de jours sous condition de sécheresse augmente. Une explication serait que les arbres pompent l'eau de la nappe, ayant ainsi un impact sur des zones éloignées. Cependant, cet effet serait, dès lors, déjà visible dans le scénario Keyline, ce qui n'est pas le cas.

## 3.6 Bilan hydrique sur une maille

Dans ces résultats, les deux types de sols seront mentionnés comme drainage favorable et drainage défavorable (drainage modéré à imparfait).

### 3.6.1 Scénario RAD

De façon générale, le stock en eau du sol est plus élevé pour le scénario RAD. Pour les deux pixels sélectionnés, les mêmes tendances pour les flux sont observées. À savoir, l'ET plus faible pour la culture de maïs en début de saison laissant les stocks en eau du sol assez élevés contrairement à la prairie. La tendance s'inverse légèrement lorsque le maïs est à son maximum de photosynthèse. Cependant, au vu de la courte période où cela se produit, les stocks n'ont pas le temps de diminuer de façon significative. Le 1er juin, la différence de recharge vers les couches profondes, par-delà 122 cm, est plus importante pour le drainage favorable (différence 22 mm/j) que pour le sol à drainage défavorable (différence de 15 mm/j).

À propos de l'ET sur sol à drainage favorable (Figure 3.14), une baisse de régime dans la période plus sèche. Cette atténuation pourrait être liée à une diminution de l'activité synthétique due à la chute du stock en eau du sol. En effet, il y a une forte corrélation entre la disponibilité en eau et la photosynthèse. En ce qui concerne le sol à drainage défavorable (Figure 3.15), on remarque que les stocks d'eau sont plus importants que pour le sol à drainage favorable sur l'ensemble de la période. On observe également une légère augmentation du stock d'eau pour

le scénario RAD pendant la période estivale, lié à une diminution de l'ET au printemps (la croissance du maïs étant plus tardive que celle des prairies). Néanmoins, il ne semble pas y avoir de diminution d'évaporation en lien avec un stress édaphique durant la période sèche sur le sol à drainage défavorable.

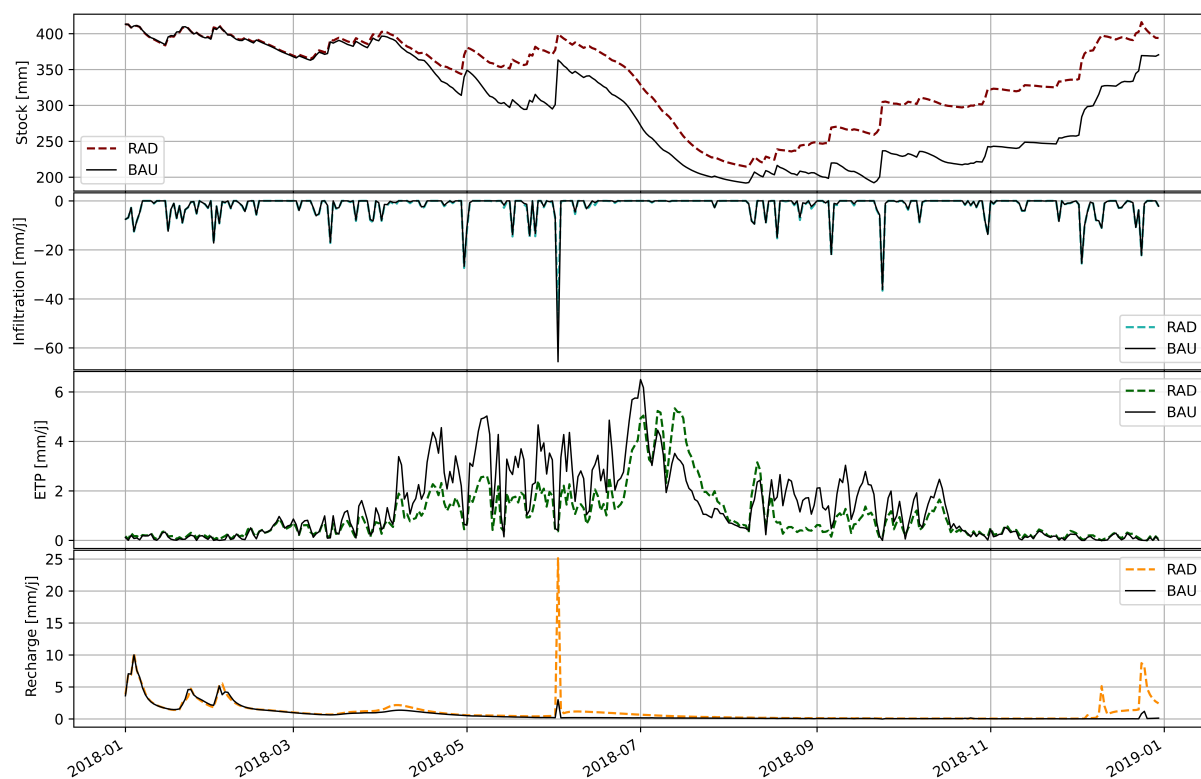


FIGURE 3.14 – Bilan en eau simplifié pour le scénario RAD sur un sol à drainage favorable (point 3 de la Figure 2.21)



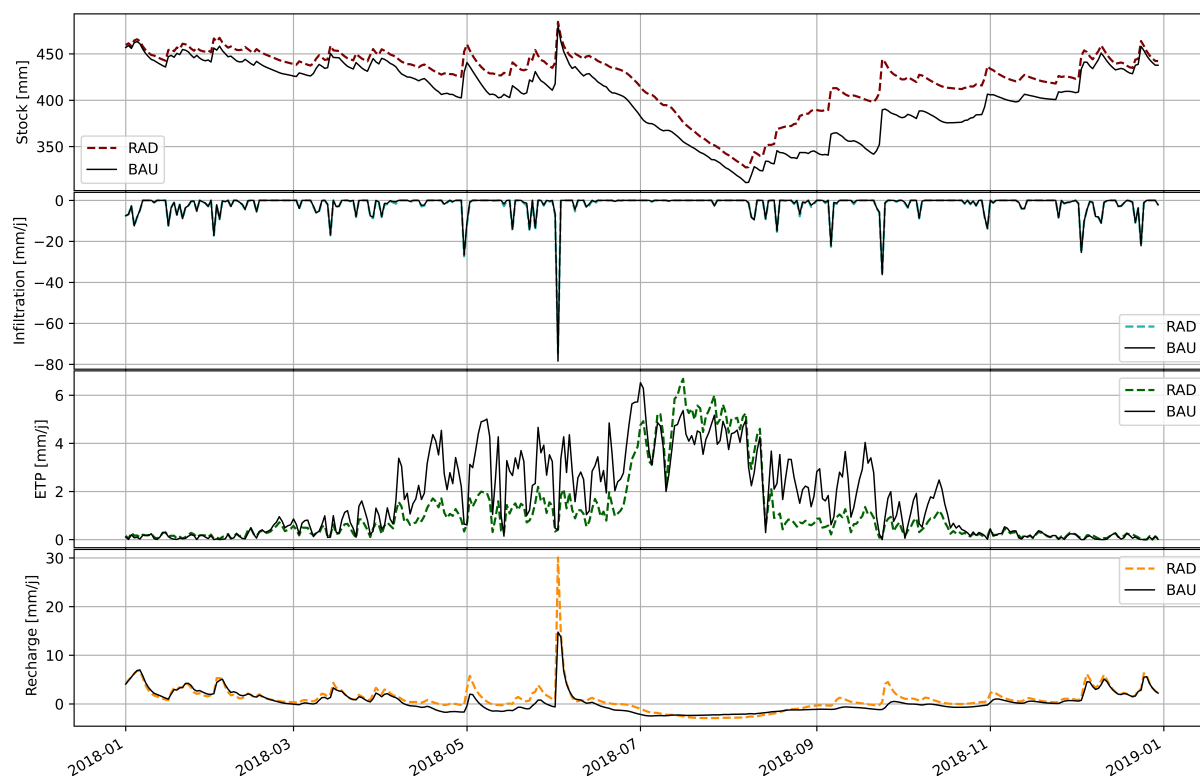


FIGURE 3.15 – Bilan en eau simplifié pour le scénario RAD sur un sol à drainage défavorable (point 2 de la Figure 2.21)

### 3.6.2 Scénarios Keyline et Keyline subsoiling

#### Drainage favorable

À la Figure 3.16, on remarque que le stock en eau chute durant la saison de végétation où on retrouve 120 mm d'eau en moins dans le sol dans les scénarios Keyline. De juin à janvier, le stock en eau du sol est plus faible que le scénario BAU. Le déficit de stock en eau en fin d'année 2018 est plus grand : 60 mm de différence en janvier et 100 mm de différence en décembre. Les flux vers les couches plus profondes sont également moins importants pour les scénarios Keyline, sauf lors de la précipitation de juin 2018. Le pic d'infiltration pour la pluie du 1er juin dans le scénario Keyline subsoiling va directement participer à la recharge des nappes. En effet, on a un gain d'infiltration de 20 mm sur la journée et une perte du même volume vers les couches inférieures.

On observe une plus forte pente dans la diminution du stock en eau du sol en juillet, période où les arbres devraient être au maximum de la photosynthèse. Si on compare l'ET avec celui du sol à drainage défavorable sur la keyline (Figure 3.19), on remarque qu'il est plus faible. La forte diminution du stock en eau a donc un effet sur la photosynthèse des arbres.

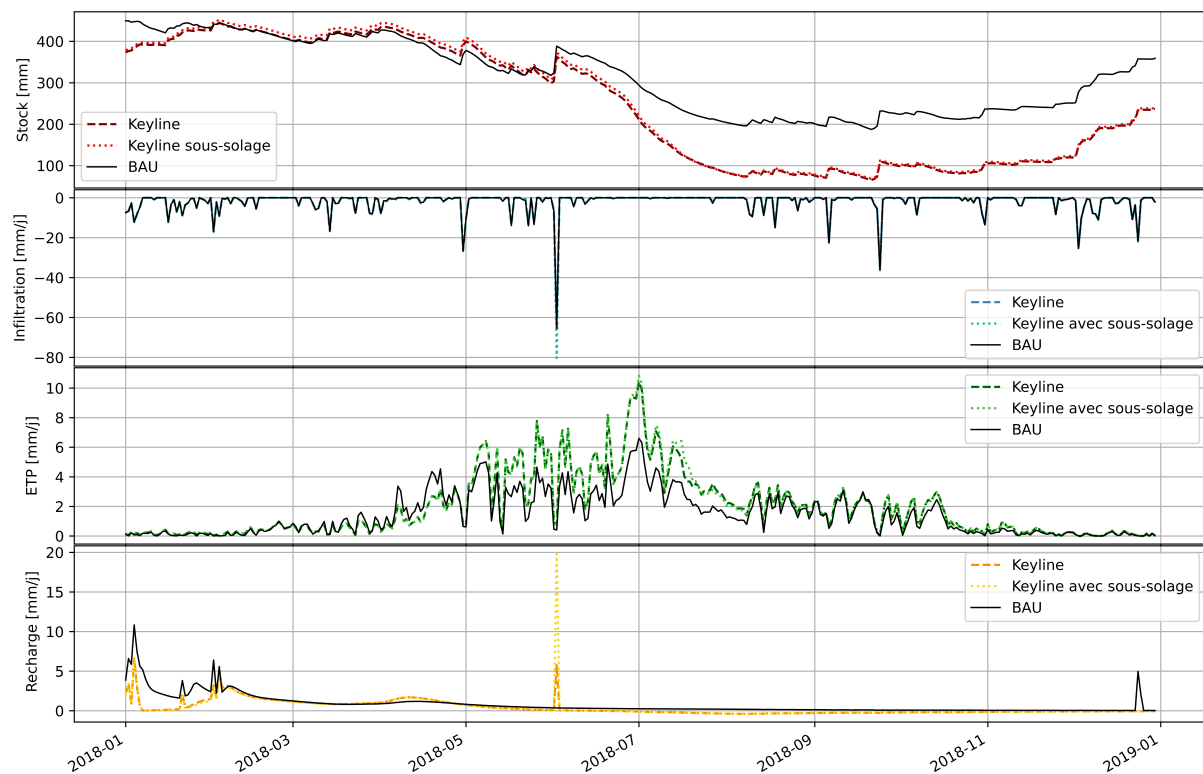


FIGURE 3.16 – Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage favorable (point 1 de la Figure 2.21) : sur la keyline

Pour ce qui est du fossé, les flux sont exactement les mêmes pour les deux scénarios jusqu'à l'averse du 1er juin (Figure 3.17). Dans le scénario Keyline, l'infiltration est à 100 mm/j comparé au 65 mm/j du BAU ; et la recharge des couches profondes à 70 mm/j contrairement au BAU où il n'y en a pas. Dans le scénario BAU, les eaux s'écoulent à la surface, tandis que dans le fossé, l'eau est stoppée et a beaucoup plus de chance de percoler dans le sol. Dès lors, le stock en eau du sol est plus grand d'une vingtaine de mm durant l'été dans le fossé.

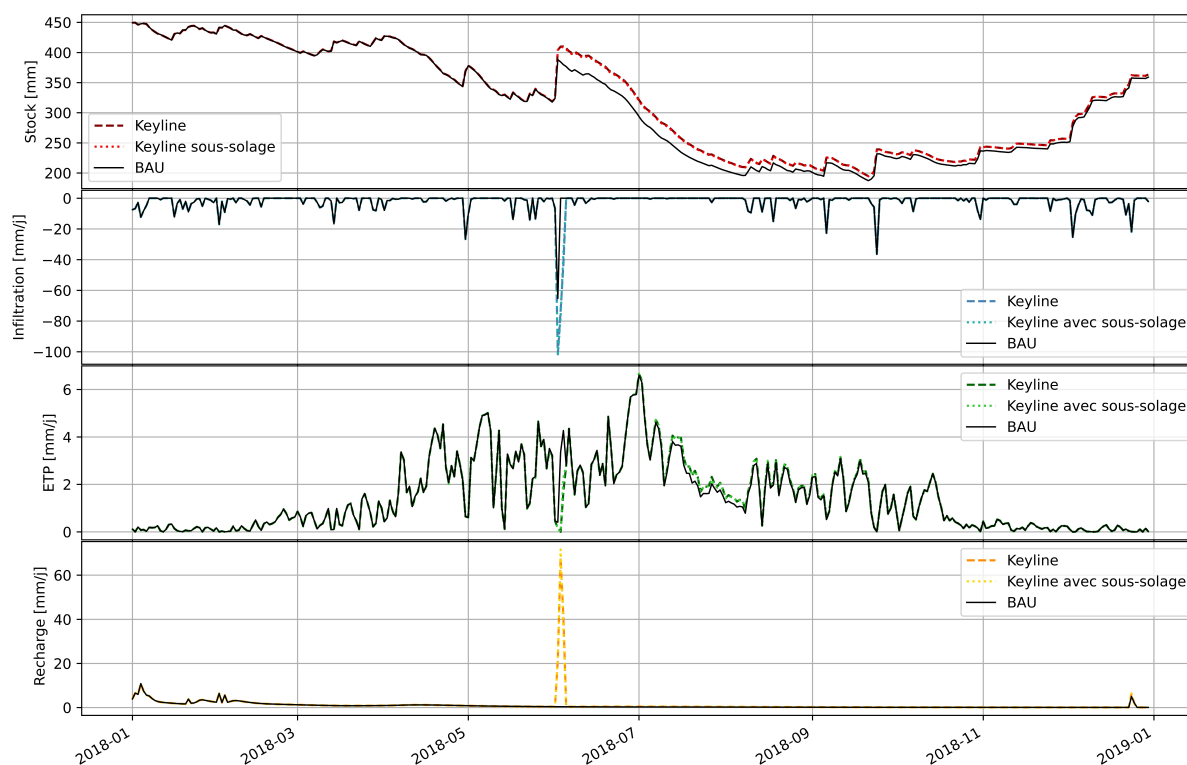


FIGURE 3.17 – Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage favorable (point 1 de la Figure 2.21) : dans le fossé

Dans la zone en aval, on a le même type d'observation que dans le fossé, avec un effet légèrement plus prononcé dans le scénario subsoiling que sans (Figure 3.18). Contrairement à ce qui se passe dans le fossé, dans ce cas-ci, c'est la rétention de stockage plus élevée, qui empêche l'eau de ruisseler. La recharge vers les couches plus profondes est la même que pour le scénario BAU. En juillet, on remarque légèrement plus d'ET, ce qui ramène les stocks des trois scénarios au même niveau en août. Étant donné que les stocks en eau sont plus élevés, cela peut être lié à la photosynthèse ou à l'évaporation. Les flux dans la zone en aval, donne une bonne estimation de ce qui se passerait dans un scénario sans plantation d'arbres sur la butée.

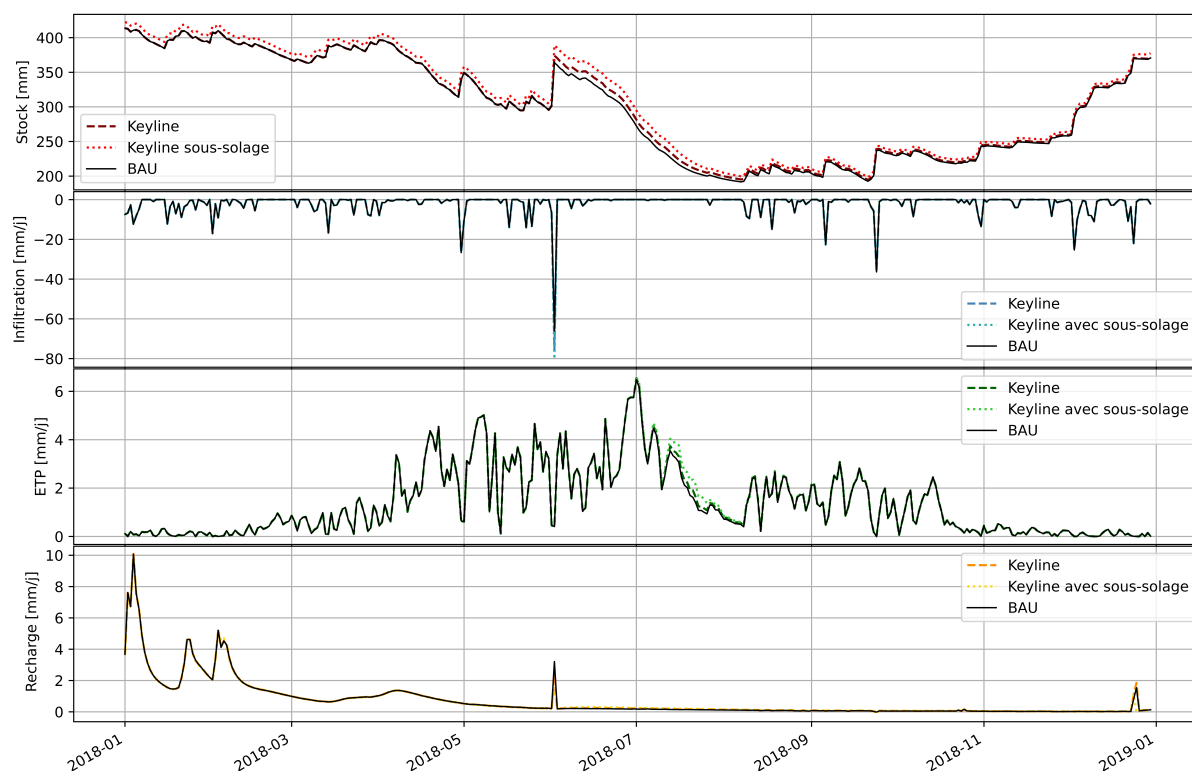


FIGURE 3.18 – Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage favorable (point 1 de la Figure 2.21) : zone en aval de la keyline

### Drainage défavorable

Il est intéressant de constater que dans les sols à drainage défavorable (Figure 3.19), on observe des remontées capillaires symbolisées par des valeurs négatives. Pour la keyline, le stock en eau chute de 70mm par rapport au scénario BAU, dans la période de juillet. De plus, on voit que le stock remonte bien plus tard dans la saison (novembre), malgré les remontées capillaires. En septembre, les arbres photosynthétisent et transpirent toujours (courbe en pointillées verts). En fin d'année, un déficit de 100 mm de stock en eau dans le sol est observé, alors qu'au début d'année, on commençait avec pratiquement le même stock.

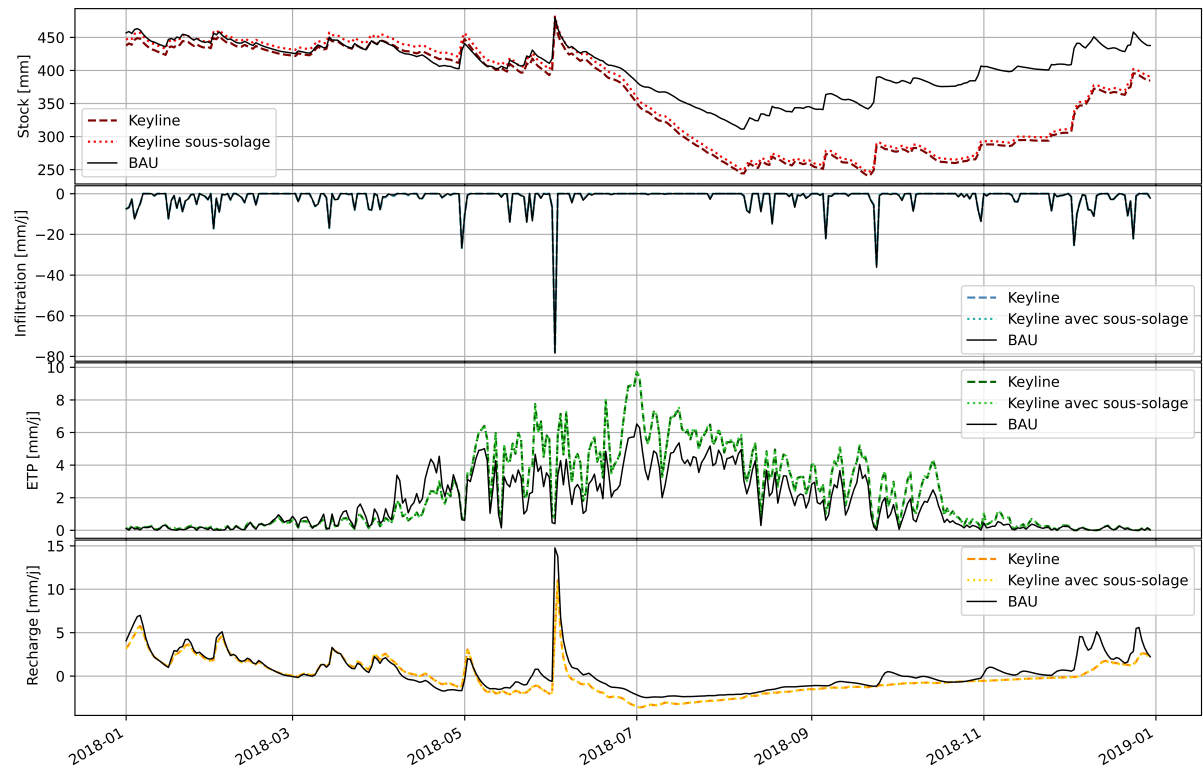


FIGURE 3.19 – Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage défavorable (point 2 de la Figure 2.21) : sur la keyline

Dans le fossé (Figure 3.20), le stock en eau du sol est supérieur à celui du scénario BAU. Les raisons sont les mêmes que pour le fossé en drainage favorable.

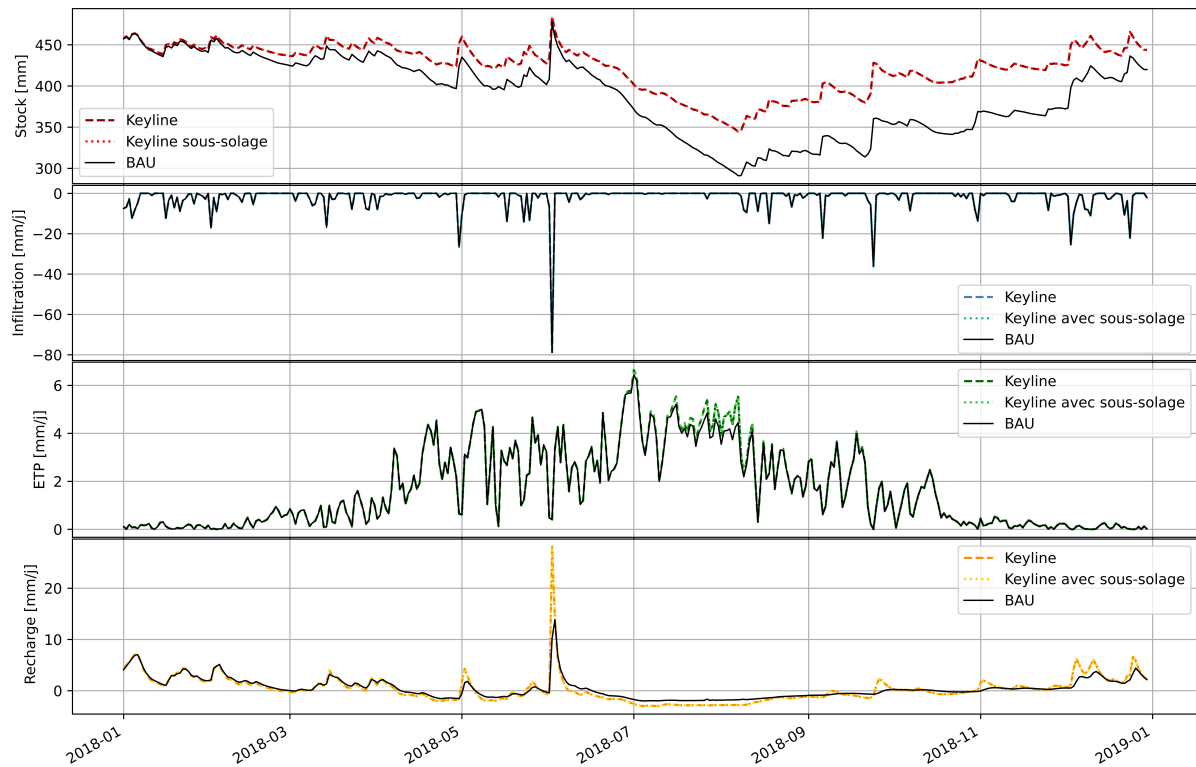


FIGURE 3.20 – Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage défavorable (point 2 de la Figure 2.21) : dans le fossé

Finalement, dans la zone en aval des keylines (Figure 3.21), on remarque un stock en eau plus élevé pour le Keyline et le Keyline subsoiling. Il est ici intéressant de noter qu'on est dans un sol à engorgement temporaire au vu des valeurs de stock en eau du sol. Les valeurs de recharge vers les nappes profondes, le 1er juin, sont nulles pour les deux scénarios. Ces valeurs sont probablement liées à la représentation choisie. En effet, cette courbe représente les flux dans la zone insaturée, or à cette période, on voit que le sol est déjà pratiquement à saturation. Pour mettre en évidence les flux vers les couches plus profondes, il aurait fallu mettre en évidence les flux dans la zone saturée à la profondeur de 122 cm.

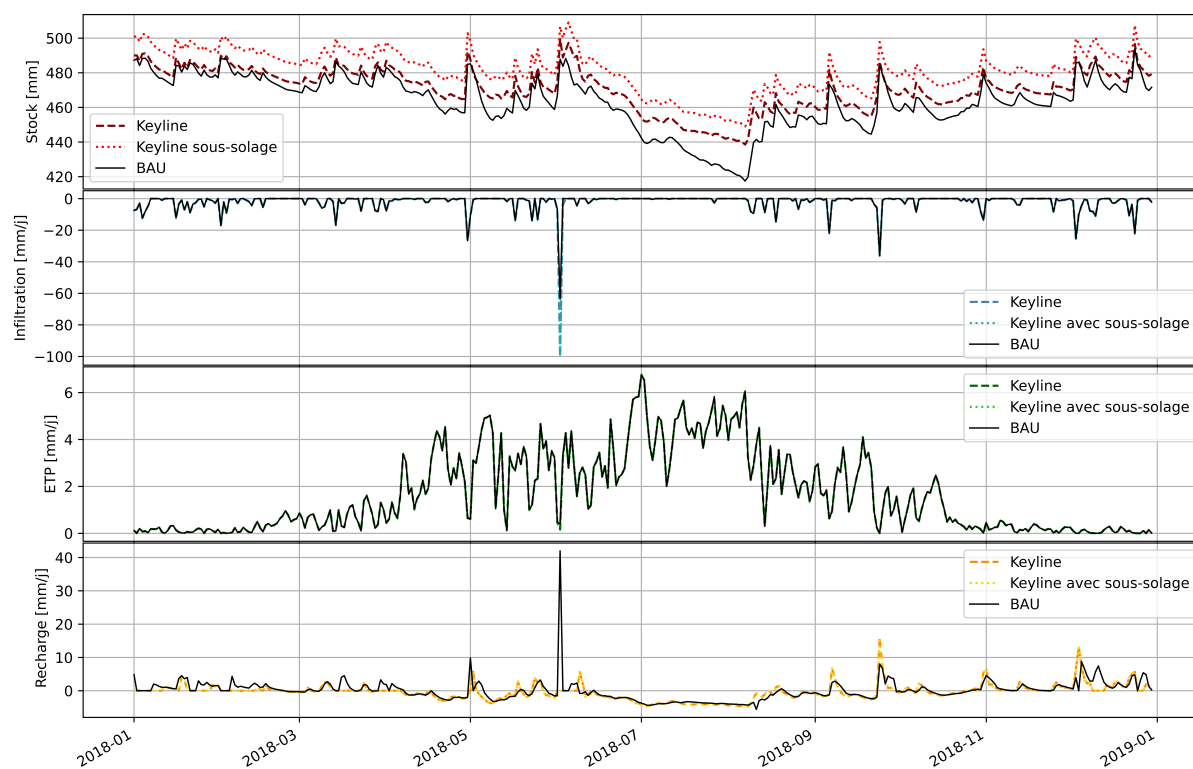


FIGURE 3.21 – Bilan en eau simplifié pour les scénarios Keyline et Keyline subsoiling sur un sol à drainage défavorable (point 2 de la Figure 2.21) : zone en aval des keylines

## Chapitre 4

# Discussions et perspectives

### 4.1 Performance pour l’aspect ruissellement

Pour le scénario RAD, il y a une augmentation de 50 % des débits maximums à l’exutoire du bassin versant (Tableau 3.1). À ce sujet, il est attesté que le passage d’une prairie à une culture de maïs augmente les volumes d’eau ruisselée (PÉREZ-GUTIÉRREZ & KUMAR, 2019). Tout d’abord, cet effet est à mettre en perspective avec la surface aménagée, 58 % du bassin est en culture de maïs dans le scénario RAD (Tableau 3.2). Par ailleurs, les cultures sarclées (telles que le maïs) sont moins rugueuses que les prairies. Cette diminution de rugosité entraîne des vitesses d’écoulement plus élevées, et un temps d’opportunité moindre pour la réinfiltration. On observe une augmentation générale de l’indice de connectivité (Figure 3.8). Lors de la crue de juillet 2021, le débit maximum arrive 45 min plus tôt (Tableau 3.3). Cela prouve que l’eau ruisselle plus vite dans le scénario RAD. Une autre raison pourrait être l’humidité du sol (Figure 3.14 et 3.15). De fait, les conditions antérieures d’humidité du sol ont un effet sur les taux d’infiltration dans le sol (ROSIER et al., 2023). Finalement, les seules barrières physiques retrouvées sont les arbres et sont supprimées par la plantation des cultures de maïs (Figure 3.4).

L’aménagement en keyline design a permis une réduction en termes de volumes totaux et de débits maximums (Tableau 3.1 et tableau 3.4). Ces observations sont en accord avec la littérature scientifique déployée jusqu’à présent (PONCE-RODRÍGUEZ et al., 2021)(GIAMBASTIANI et al., 2023), démontrant une plus grande retenue des eaux sur les keylines. Le décalage temporel, cependant, est inférieur à 15 min. Au vu de la taille du bassin versant considéré, il semble normal que le décalage temporel soit faible. On observe finalement une modification du passage de l’eau sur le bassin versant et retenue efficace des eaux ruisselées en amont des keylines (Figure 3.9). Cependant, l’effet de la connectivité hydrologique sur le débit à l’exutoire a un moindre impact comparé à d’autres variables (FREY et al., 2021).

Concernant le choix de l’aménagement en fossés-butées, les fossés permettaient une conduite efficace des eaux de ruissellement (HUANG et al., 2018). On observe d’ailleurs une augmentation du ruissellement dans le fossé (Figure 3.5). Dans la zone à drainage favorable, l’aménagement en fossé permet également une infiltration d’eau lors de l’averse du 1er juin 2018 (Figure 3.17).

Pour ce qui est de la butée avec une plantation d’arbres, on observe une diminution des stocks en eau (Figure 3.16 et Figure 3.19). Cela permet de retarder la saturation du sol lors d’averses. En effet, le sol sera capable d’infiltrer plus d’eau, l’empêchant de ruisseler. Localement, on observe une réduction du ruissellement de surface sur la keyline en juillet 2021 (Figure 3.5) et une légère augmentation de l’infiltration 1er juin 2018 pour le sol à drainage favorable (3.16).



Ceci confirme l'hypothèse formulée, mais cela n'est pas visible sur d'autres événements pluvieux.

Pour le sous-solage, on observe une légère amélioration de la réduction de ruissellement par rapport au Keyline pour les débits en sortie de bassin versant (Tableau 3.1 et 3.5 et Figure 3.6), ainsi qu'une diminution plus importante des coefficients de ruissellement (Figure 3.6). Le sous-solage montre une amélioration de la rétention en eau des sols (NING et al., 2022)(YU et al., 2023) mais aucune recherche scientifique n'a été menée, pour l'instant, pour voir l'effet sur la réduction de ruissellement. Peut-être que les paramètres ajustés (teneur en eau du sol et conductivité hydraulique à saturation) auraient pu être mieux adaptés pour retenir plus efficacement de l'eau.

## 4.2 Performance pour l'aspect sécheresse

Sur le bilan annuel, les stocks en eau du sol sont plus élevés pour le scénario RAD (Figure 3.14 et 3.15) et le nombre de jours consécutifs sous condition sèche diminue considérablement (Figure 3.11). L'eau du sol est prélevée par les racines et ensuite sort du système via l'ET. Étant donné que la culture de maïs se concentre sur une mince période (Figure 2.19), elle laisse le sol sans couverture végétale le restant de l'année. Le cumul de l'ET est, dès lors, largement en dessous de ce qui est observé sur une prairie.

Sur la keyline, on constate que l'implantation de végétations arbustives conduit à une augmentation de l'ET (Figure 3.16 et Figure 3.19) et potentiellement à une sécheresse du sol plus importante localement (Figure 3.12). Étant donné que les arbres ont des racines profondes, le stress engendré à la surface ne signifie pas forcément un stress pour la plante. On observe tout de même une diminution de l'ET des arbres durant l'été de 2018 sur le sol à drainage défavorable (Figure 3.19). De fait, on retrouve plusieurs conditions menant à un stress pour la plante, à savoir, un déficit de précipitations et une ET potentielle élevée (ici lié à l'augmentation du stock en eau du sol) (YANG et al., 2023).

Bien que l'effet de la plantation d'arbres reste assez localisé, si on regarde la carte du nombre de jours cumulés sous condition sèche, l'effet de cette plantation est contrebalancé par les effets retrouvés dans les fossés et dans la zone en aval (Figure 3.12). En effet, on observe une augmentation de la teneur en eau des sols dans le fossé et dans la zone en aval des keylines (Figures 3.17, 3.18, 3.20 et 3.21). Pour rappel, dans la zone en aval, seule la rétention de surface est augmentée dans le scénario Keyline. Ainsi, les comportements retrouvés en aval estiment assez bien ce qu'on retrouverait pour un aménagement en fossé-butée sans plantation d'arbres. Il serait dès lors plus judicieux de choisir un autre type de végétation pour la keyline, avec un développement racinaire et une ET plus faible (Figure 4.1).



FIGURE 4.1 – Photo pour illustrer les types de végétations retrouvés sur une keyline (Visite du site des alvéoles)

Finalement, le sous-solage comporte des différences d'efficacité entre le drainage favorable et défavorable pour la sévérité des sécheresses, il sera donc discuté dans le prochain point.

### 4.3 Efficacité en fonction du type de drainage du sol

#### Drainage favorable

Nous allons maintenant comparer l'efficacité des aménagements sur les deux types de sols, qui seront ici mentionnés, pour rappel, comme drainage favorable et drainage défavorable (drainage modéré à imparfait).

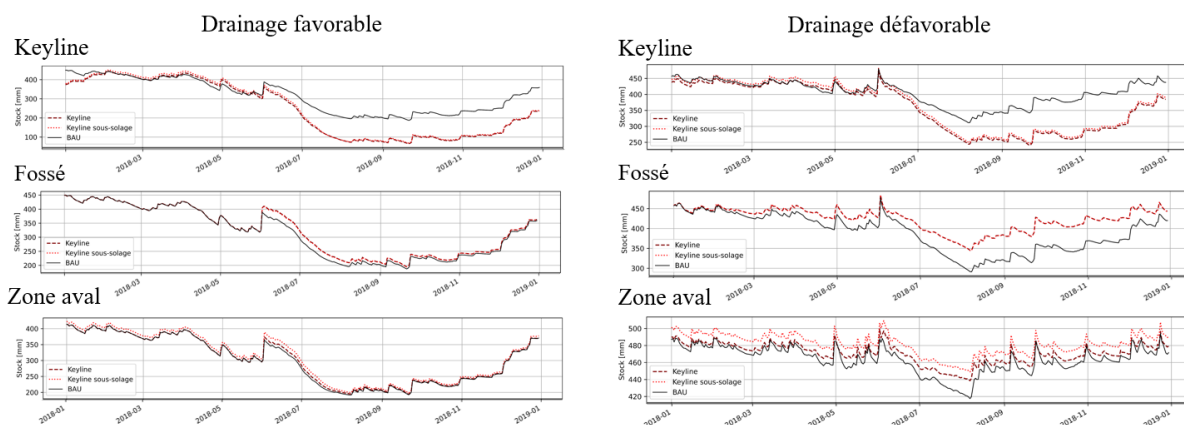


FIGURE 4.2 – Stock en eau des sols selon les différents types de drainage aux différents points pour l'année 2018

Le sol à drainage favorable a un stock en eau du sol bien plus bas que le sol à drainage défavorable, descendant jusqu'à 200 mm de stock en eau sur les 122 cm de profondeur (figure 51). De plus, de façon générale, l'ET pour le sol à drainage favorable est moins élevé durant la période sèche, entre juillet et août (Figure 4.3). Pour la plantation d'arbres sur la keyline, la diminution de l'ET en juillet peut être mise en parallèle à la diminution du stock en eau (Figure 3.16). A contrario, lorsque les stocks en eau du sol augmentent (Figure 4.3 : fossé et zone en aval), une légère augmentation de l'ET est visible. Ainsi, la disponibilité en eau dans le sol à drainage favorable serait un facteur limitant de l'activité photosynthétique. Cependant, ce manque d'eau dans le sol permet aussi d'en infiltrer plus le 1er juin 2018 (Figure 3.16).

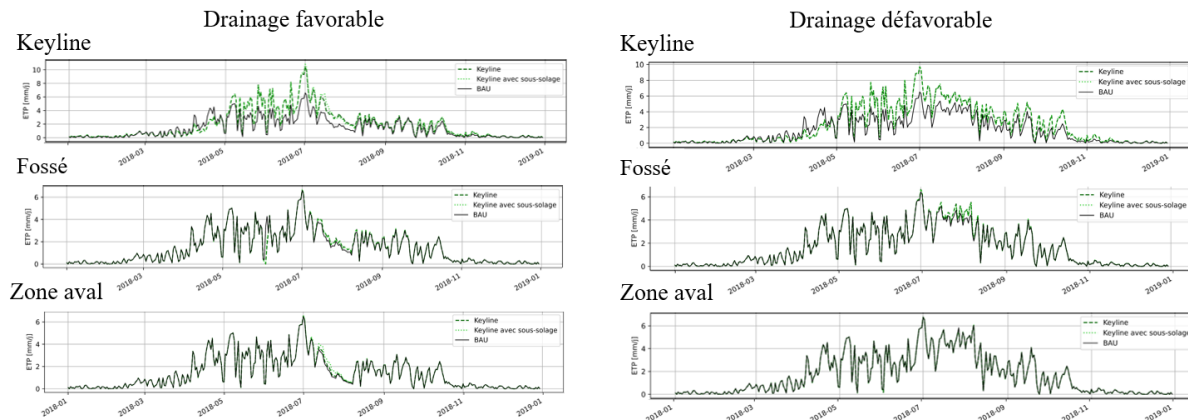


FIGURE 4.3 – Flux d'évapotranspiration selon les différents types de drainage aux différents points pour l'année 2018

Pour le sous-solage, les zones où il y a une réduction du nombre de jours sous condition sèche significative (Figure 3.13) sont des zones d'aménagement sur des sols à drainage favorable (Figure 2.16 : aménagements, Figure 2.21 : drainage). Cette observation est à mettre en parallèle avec la diminution du ruissellement sur les mêmes zones (Figure 3.6). Le sous-solage permettrait donc une meilleure infiltration des eaux de surface. Cette hypothèse est confirmée par une légère augmentation de l'infiltration des eaux en surface pour l'averse du 1er juin 2018 (Figure 3.21).

## Drainage défavorable

Le sol à drainage défavorable ne descend jamais en dessous de 300 mm sur 122 cm de profondeur dans le BAU (figure 4.2). Pour ce qui est des fossés et de la zone en aval, les aménagements augmentent considérablement les stocks en eau du sol sur toute l'année. Pour le fossé, l'augmentation du stock a pour effet d'augmenter l'ET. Ainsi, l'eau ajoutée permet à la plante d'arriver au maximum du potentiel de son activité photosynthétique (Figure 3.20). Par contre, pour la zone en aval, on n'observe aucune amélioration de l'ET (Figure 3.21). Comme mentionné dans les résultats, on se trouve probablement dans un sol à engorgement temporaire pour la zone en aval. Aussi, le stock d'eau dans ce sol n'est pas un facteur limitant pour l'activité des plantes.

En ce qui concerne la plantation arbustive, on observe une plus forte diminution des stocks en eau du sol, mais cela n'engendre pas de stress édaphique (Figure 3.19). En effet, comme mentionné plus haut, le stock en eau est toujours relativement haut pour ce type de sol et au vu des racines profondes des arbres, ils ont moins de chance de subir un stress édaphique.

Finalement, le sous-solage a pour effet d'augmenter légèrement plus les stocks en eau que le scénario Keyline. Par contre, aucun effet sur l'ET n'est visible (Figure 3.21). De plus, on remarque qu'il ne diminue pas le nombre de jours consécutifs sous condition sèche, étant donné que les conditions sont déjà humides (Figure 3.6). Il permet néanmoins une augmentation de l'infiltration de 40 % lors de l'averse du 1er juin 2018 (Figure 3.21) et diminue la production de ruissellement localement lors de l'averse de juillet 2021 (Figure 3.6). En effet, la macroporosité du sol amenée par le passage de la sous-soleuse va permettre d'accueillir plus d'eau que le scénario BAU. Cependant, cette réduction de ruissellement n'est pas retrouvée sur les autres aménagements en zone à drainage défavorable (Figure 2.16 : aménagements, Figure 2.21 : drainage, Figure 3.21 : CR).

En conclusion, pour le facteur drainage, les résultats de ce travail nécessiteraient des analyses complémentaires. En effet, nous n'observons ici qu'une seule année de données et en seulement 2 points du bassin. Aussi, les hypothèses et conclusions sont à prendre avec précautions concernant l'effet différencié des aménagements en fonction du drainage.

## 4.4 Perspectives d'amélioration

Nous allons ici aborder des pistes pour améliorer le modèle, mais aussi des perspectives de recherche pour quantifier l'impact des keylines et de l'Hydrologie régénérative au sens large.

### 4.4.1 Améliorations du modèle

Tout d'abord, en ce qui concerne le design sélectionné, différents points sont à améliorer. Pour le traçage des keylines, des analyses dites de « coût distance » auraient pu être réalisées. En effet, cela permet de donner plusieurs conditions ; comme fixer la pente de la keyline, imposer un point de départ et d'arrivée, et ainsi de formaliser la création du design. Deuxièmement, la création de différents designs permettrait d'attester de l'efficacité de la méthode de sélection des keylines via les keypoints. Le travail de Pérez-Gutiérrez a permis de mettre en lumière certaines tendances via une multitude de design du territoire. Par exemple, que les aménagements soient plus efficaces pour limiter les débits à l'exutoire lorsqu'ils se trouvent en amont et lorsqu'ils sont denses (PÉREZ-GUTIÉRREZ & KUMAR, 2019). L'efficacité des aménagements en keyline va dépendre du design, du type de paysage dans lequel il s'inclut, aussi, ce type d'analyse aurait



permis d'optimiser le design en fonction des objectifs de recherche.

Concernant le choix des aménagements, on constate via l'indice de connectivité que l'eau en amont des aménagements trouve toujours un chemin vers l'exutoire (Figure 3.9). Or le but des aménagements est de retenir un maximum d'eau sur le bassin et pas seulement de la ralentir. Différents designs auraient pu être imaginés pour endiguer cet effet. Par exemple, le fait d'arrêter la keyline avant la fin pour permettre à l'eau de ruisseler sur les aménagements et ainsi avoir plus de chance d'être réinfiltrée (Figure 4.4). Ou encore, fermer la fin de la ligne des fossés-butées avec un renfort en butée à l'extrémité, pour empêcher l'eau de continuer son parcours.



FIGURE 4.4 – Représentation des aménagements discutés (a) arrêt de la keyline avant la ligne de crête, (b) renfort en butée à l'extrémité de la keyline

Finalement, des statistiques sur les événements extrêmes auraient permis d'augmenter la robustesse des résultats présentés ici. Il aurait dès lors été possible de mettre en relation la sévérité d'un événement, en fonction de sa période de retour. Ainsi, les droites de régression de cette relation auraient pu faire apparaître un optimum d'efficacité pour les aménagements considérés. Pour réaliser ces statistiques extrêmes, il aurait fallu des périodes de modélisation plus longues. Les temps de calcul du modèle sont trop longs pour le faire dans le cadre de ce travail de fin d'études.

#### 4.4.2 Perspectives de recherche

L'ETP peut être perçu comme une perte sèche pour l'écosystème dans ce travail, seulement, on ne prend pas en compte la rétroaction positive de l'eau évaporée. Il a pu être mis en évidence que localement, cette ET peut contribuer à des pluies supplémentaires (Li et al., 2018). Des modèles couplés terre-atmosphère permettraient de quantifier la rétroaction du changement de végétation sur les précipitations, par l'intermédiaire de la circulation atmosphérique. De plus, il a été démontré qu'une large plantation d'arbres pouvait avoir un effet sur la hauteur de la nappe phréatique (Li et al., 2018). Des analyses complémentaires sur la hauteur de nappe permettraient peut-être d'expliquer certains phénomènes en amont des zones aménagées, comme observés aux Figures 3.6 et 3.13.

Par ailleurs, les keylines n'ont pas seulement un potentiel dans le domaine de l'Hydrologie. Il serait dès lors intéressant de quantifier la performance multifonctionnelle des keylines. Une étude a par exemple été menée pour collecter des images satellitaires afin de suivre l'évolution de la capture de carbone en surface sur des keylines, dans le cadre de la restauration d'écosystème (GABRIELE & BRUMANA, 2023). Ce type de suivi peut confirmer certaines hypothèses faites par rapport à l'ETP ou la photosynthèse. D'autres techniques de mesure sont actuellement développées et permettraient de quantifier la santé des sols en keyline (BRAUMAN A., 2020), évaluer la durabilité de cet agroécosystème (BONAUDO et al., 2014) ou encore évaluer les externalités positives de ce type d'agriculture (MACHÁČ et al., 2021).

Finalement, l'effet sur le long terme de ces aménagements n'est pas pris en compte. Les modèles hydrologiques utilisés ne sont pas conçus de façon évolutive. On ne connaît pas l'évolution de la macroporosité des sols ou encore l'efficacité dans le temps des fossés-butées, ni l'entretien, que ça soit en ce qui concerne le passage de la sous-soleuse, du curage des fossés ou du rehaussement des butées. Pourtant, une quantification de la charge d'entretien et du coût économique que cela représente pourrait affiner l'étude du potentiel des keylines dans un contexte socio-économique. Il faudrait réaliser une analyse suivant la même méthode que le document sur l'analyse coûts-avantages (DOGOT et al., 2014) vouée à être un outil d'aide à la décision pour les particuliers.

## Chapitre 5

# Conclusion

En résumé, les différents aménagements de ce travail ont permis d’explorer plusieurs aspects cruciaux de la gestion des eaux de ruissellement et de la réduction de la sévérité des sécheresses. Les résultats ont mis en évidence des tendances significatives pour les débits à l’exutoire, la production de ruissellement spatialisé, les stocks en eau de sol et les flux régissant leurs interactions.

Le scénario RAD a montré une augmentation marquée des débits maximums à l’exutoire du bassin versant. La conversion des prairies en culture de maïs a entraîné une augmentation des vitesses d’écoulement et un raccourcissement du temps d’opportunité pour la réinfiltration. La réduction sur la sévérité des sécheresses est principalement liée à la faible période végétative attribuée à la culture de maïs, diminuant l’ET cumulée par rapport à la prairie.

L’emploi de fossés-butées a montré son efficacité dans la gestion des eaux de ruissellement. Les fossés ont permis une conduite et une infiltration efficace des eaux, notamment dans les zones à drainage favorable. L’implantation d’arbres sur la keyline a eu un impact considérable sur les stocks en eau du sol et l’ET localement, pouvant parfois mener à des stress édaphiques. Cet effet est toutefois contrebalancé par les aménagements dans le fossé et en aval. Il serait intéressant de réfléchir à d’autres types de végétation pour de futures recherches.

En ce qui concerne le sous-solage, bien que des améliorations soient observées en termes de réduction du ruissellement et de rétention d’eau, il reste des questions sur son efficacité dans différentes conditions de drainage. L’étude met en évidence la nécessité de réaliser des analyses complémentaires sur la caractérisation des paramètres hydrauliques du sol avec le passage d’une sous-soleuse.

En conclusion, les résultats ont montré que chaque scénario a ses avantages et ses limites, souvent liés au sol, à la végétation et aux conditions de drainage. Cette étude démontre le potentiel prometteur de l’Hydrologie régénérative et souligne l’importance d’une approche holistique et adaptative pour la gestion des eaux, en tenant compte des interactions complexes entre les différents facteurs hydrologiques et environnementaux.



## Chapitre 6

# Contribution de l'étudiant

L'étudiant a contribué aux différentes étapes de cette étude : réalisation d'une documentation sérieuse sur l'Hydrologie régénérative et l'aménagement en keyline design, la collecte et le pré-traitement des données d'entrées du modèle, l'implémentation des données dans le logiciel MikeSHE, la modélisation des flux hydrologiques, le traitement et l'analyse des données en sorties du modèle, l'interprétation des résultats, la rédaction et la communication des résultats.

## Chapitre 7

# Bibliographie

- ANTOLINI, F., TATE, E., DALZELL, B., YOUNG, N., JOHNSON, K., & HAWTHORNE, P. L. (2020). Flood risk reduction from agricultural best management practices. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(1), 161-179.
- BASCHE, A. D., & DELONGE, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods : A meta-analysis. *PloS One*, 14(9), e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- BAUWENS, A., SOHIER, C., & DEGRÉ, A. (2013). Impacts du changement climatique sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau du bassin de la Meuse (synthèse bibliographique). *BASE*.
- BECKERS, E., & DEGRE, A. (2011). Revue bibliographique : la prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 15(1).
- BONAUDO, T., BENDAHAN, A. B., SABATIER, R., RYSCHAWY, J., BELLON, S., LEGER, F., MAGDA, D., & TICHIT, M. (2014). Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *European Journal of Agronomy*, 57, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>
- BOOIJ, M. J. (2005). Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *Journal of Hydrology*, 303(1), 176-198. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.013>
- BOSWELL, O., BIELDERS, C., & CLEMENT, T. (s. d.). Impact du strip-till et des sous-semis de trèfle blanc et de fétuque rouge en culture de maïs sur le ruissellement, l'érosion, le transfert de pesticides et les propriétés physiques du sol.
- BRAUMAN A., T. A. (2020). Biofunctool® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, basé sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol. *Etude et Gestion des Sols*, 27(1), 289-303.
- BUTTS, M. B., PAYNE, J. T., KRISTENSEN, M., & MADSEN, H. (2004). An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 298(1), 242-266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.042>
- The Distributed Model Intercomparison Project (DMIP)
- CHENG, G., & LI, X. (2015). Integrated research methods in watershed science. *Science China Earth Sciences*, 58(7), 1159-1168. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5074-x>
- Communiqués de presse de la Wallonie. (s. d.).
- convention to combat desertification (COP15), U. N. (Éd.). (2022). Drought in numbers : restoration for readiness and resilience.

- CUNGE, J. A., & WEGNER, M. (1964). Intégration numérique des équations d'écoulement de Barré de Saint-Venant par un schéma implicite de différences finies. *La Houille Blanche*, (1), 33-39.
- DĄBROWSKA, J., MENÉNDEZ ORELLANA, A. E., KILIAN, W., MORYL, A., CIELECKA, N., MICHAŁOWSKA, K., POLICHT-LATAWIEC, A., MICHALSKI, A., BEDNAREK, A., & WŁÓKA, A. (2023). Between flood and drought : How cities are facing water surplus and scarcity. *Journal of Environmental Management*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118557>
- DE CLIPPELE, A. (2021). Diagnostic agricole et alimentaire de l'arrondissement de Verviers (Région wallonne) et identification de filière à soutenir.
- DELANDMETER, M. (2021). Modélisation de systèmes agricoles - Analyse prospective de l'évolution face au changement climatique des performances agronomiques, environnementales et alimentaires de systèmes de production agricole contrastés. *Dumont, Benjamin*.
- DELONGE, M., & BASCHE, A. (2018). Managing grazing lands to improve soils and promote climate change adaptation and mitigation : a global synthesis. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 33(3), 267-278. <https://doi.org/10.1017/S1742170517000588>
- de WALQUE, B., DEGRÉ, A., MAUGNARD, A., & BIELDERS, C. L. (2017). Artificial surfaces characteristics and sediment connectivity explain muddy flood hazard in Wallonia. *CATENA*, 158, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.016>
- DOGOT, T., XANTHOULIS, D., GRÉGOIRE, M., & DEBAUCHE, O. (2014). Appui à la gestion des risques d'inondation par ruissellement en zones rurales. Analyse coûts-avantages et aide à la décision. Document de vulgarisation.
- ECOMONTADO. (s. d.).
- EUGÈNE, L. (2023). Analyse de la dynamique spatiale et temporelle des réseaux de haies au sein des paysages agricoles wallons.
- FAHAD, S., CHAVAN, S., CHICHAGHARE, A., UTHAPPA, A., KUMAR, M., KAKADE, V., PRADHAN, A., JINGER, D., RAWALE, G., YADAV, D., KUMAR, V., FAROOQ, T., ALI, B., SAWANT, A., SAUD, S., CHEN, S., & POZAI, P. (2022). Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. *Sustainability (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142214877>
- FERGUSON, R. S., & LOVELL, S. T. (2014). Permaculture for agroecology : design, movement, practice, and worldview. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 251-274. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0181-6>
- FOLKENS, L., BACHMANN, D., & SCHNEIDER, P. (2023). Driving Forces and Socio-Economic Impacts of Low-Flow Events in Central Europe : A Literature Review Using DPSIR Criteria. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310692>
- FREY, S., MILLER, K., KHADER, O., TAYLOR, A., MORRISON, D., XU, X., BERG, S., HWANG, H.-T., SUDICKY, E., & LAPEN, D. (2021). Evaluating landscape influences on hydrologic behavior with a fully-integrated groundwater – surface water model. *Journal of Hydrology*, 602. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126758>
- GABRIELE, M., & BRUMANA, R. (2023). Monitoring Land Degradation Dynamics to Support Landscape Restoration Actions in Remote Areas of the Mediterranean Basin (Murcia Region, Spain). *Sensors*, 23(6), 2947. <https://doi.org/10.3390/s23062947>
- GIAMBASTIANI, Y., BIANCOFIORE, G., MANCINI, M., DI GIORGIO, A., GIUSTI, R., CECCHI, S., GARDIN, L., & ERRICO, A. (2023). Modelling the Effect of Keyline Practice on Soil Erosion Control. *Land*, 12(1), 100. <https://doi.org/10.3390/land12010100>
- HALLIER, B. (2023). REPORTAGE. Journée mondiale de l'eau : qu'est-ce que le "Keyline design", cette technique venue d'Australie pour "planter la pluie" ? *Franceinfo*.

- HANG, C., GAO, X., YUAN, M., HUANG, Y., & ZHU, R. (2018). Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler. *Biosystems Engineering*, 168, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.03.008>
- HAWKINS, R. H. (1993). Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(2), 334-345. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:2\(334\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:2(334))
- HAWKINS, R. H., WARD, T. J., WOODWARD, D. E., & VAN MULLEM, J. A. (2008). *Curve Number Hydrology*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784410042>
- HUANG, C.-L., HSU, N.-S., LIU, H.-J., & HUANG, Y.-H. (2018). Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation. *Journal of Hydrology*, 564, 542-558. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.044>
- HUANG, C., & XU, N. (2022). Quantifying urban expansion from 1985 to 2018 in large cities worldwide. *Geocarto international*, 37(27), 18356-18371.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (Éd.). (2022). Summary for Policymakers. In *Climate Change and Land : IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems* (p. 1-36). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>
- KELLER, A. A., GARNER, K., RAO, N., KNIPPING, E., & THOMAS, J. (2023). Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale : A critical review of existing hydrologic and water quality models. *Science of The Total Environment*, 867, 161209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161209>
- KRISTENSEN, K. J., & JENSEN, S. E. (1975). MODEL FOR ESTIMATING ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION FROM POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION. *Nord Hydrol*, 6(3), 170-188. <https://doi.org/10.2166/nh.1975.0012>
- LEGRAIN, X., DEMARCIN, P., COLINET, G., & BOCK, L. (2011). Cartographie des sols en Belgique : aperçu historique et présentation des travaux actuels de valorisation et de révision de la Carte Numérique des Sols de Wallonie. *Biotechnologie, agronomie, société et environnement*, 15(S2), 647-656.
- LI, X., CHENG, G., LIN, H., CAI, X., FANG, M., GE, Y., HU, X., CHEN, M., & LI, W. (2018). Watershed System Model : The Essentials to Model Complex Human-Nature System at the River Basin Scale. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 123(6), 3019-3034. <https://doi.org/10.1002/2017JD028154>
- LOU, S., HE, J., LU, C., LIU, P., LI, H., & ZHANG, Z. (2021). A Tillage Depth Monitoring and Control System for the Independent Adjustment of Each Subsoiling Shovel. *Actuators*, 10(10), 250. <https://doi.org/10.3390/act10100250>
- MACHÁČ, J., TRANTINOVÁ, M., & ZAŇKOVÁ, L. (2021). Externalities in agriculture : How to include their monetary value in decision-making ? *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(1), 3-20. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02752-7>
- MAGDOFF, F., & VAN ES, H. (2021). *Building soils for better crops*.
- MUALEM, Y. (1986). Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils : Prediction and Formulas. In *Methods of Soil Analysis* (p. 799-823). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c31>
- NING, T., LIU, Z., HU, H., LI, G., & KUZYAKOV, Y. (2022). Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 223, 105490. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105490>

- PÉREZ-GUTIÉRREZ, J. D., & KUMAR, S. (2019). Simulating the influence of integrated crop-livestock systems on water yield at watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 239, 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.068>
- PONCE, V. M., & HAWKINS, R. H. (1996). Runoff Curve Number : Has It Reached Maturity ? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))
- PONCE-RODRÍGUEZ, M., CARRETE-CARREÓN, F., NÚÑEZ-FERNÁNDEZ, G., MUÑOZ-RAMOS, J., & PÉREZ-LÓPEZ, M.-E. (2021). Keyline in bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) for soil and water conservation. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179982>
- Pour une Hydrologie régénérative. (s. d.).
- RICHARDS, L. A. (2004). CAPILLARY CONDUCTION OF LIQUIDS THROUGH POROUS MEDIUMS. *Physics*, 1(5), 318-333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- RICHEL, J.-B., OUVRY, J. .-, & SAUNIER, M. (2017). The role of vegetative barriers such as fascines and dense shrub hedges in catchment management to reduce runoff and erosion effects : Experimental evidence of efficiency, and conditions of use. *Ecological Engineering*, 103, 455-469. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.008>
- ROBERTS, M. T., GERIS, J., HALLETT, P. D., & WILKINSON, M. E. (2023). Mitigating floods and attenuating surface runoff with temporary storage areas in headwaters. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Water*, 10(3), e1634.
- RONDEUX, J. (2022). La résilience forestière, vocabulaire et concept. *Les Infos de RND*, (2ème Trimestre).
- ROSIER, I., DIELS, J., SOMERS, B., & VAN ORSHOVEN, J. (2023). The impact of vegetated landscape elements on runoff in a small agricultural watershed : A modelling study. *Journal of Hydrology*, 617. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129144>
- SALVADOR, C., NIETO, R., VICENTE-SERRANO, S. M., GARCÍA-HERRERA, R., GIMENO, L., & VICEDO-CABRERA, A. M. (2023). Public Health Implications of Drought in a Climate Change Context : A Critical Review. *Annual review of public health*, 44(1), 213-232.
- SHEPARD, M. (2020). *Water for any farm : applying restoration agriculture water management methods on your farm*. Acres U.S.A.
- SILVA, R. F. d., SEVERIANO, E. d. C., OLIVEIRA, G. C. d., BARBOSA, S. M., PEIXOTO, D. S., TASSINARI, D., SILVA, B. M., SILVA, S. H. G., DIAS JÚNIOR, M. d. S., & FIGUEIREDO, T. d. F. R. (2021). Changes in soil profile hydraulic properties and porosity as affected by deep tillage soil preparation and Brachiaria grass intercropping in a recent coffee plantation on a naturally dense Inceptisol. *Soil and Tillage Research*, 213, 105127. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105127>
- SOHIER, C. (2011). Développement d'un modèle hydrologique sol et zone vadose afin d'évaluer l'impact des pollutions diffuses et des mesures d'atténuation sur la qualité des eaux en Région wallonne.
- STATBEL (Éd.). (2020). Chiffres clés de l'agriculture 2020.
- STRELKOFF, T. (1970). Numerical solution of Saint-Venant equations. *Journal of the Hydraulics division*, 96(1), 223-252.
- SUN, Y., ZENG, Y., SHI, Q., PAN, X., & HUANG, S. (2015). No-tillage controls on runoff : A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 153, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.007>
- SZABÓ, B., WEYNANTS, M., & WEBER, T. K. D. (2021). Updated European hydraulic pedo-transfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2). *Geoscientific Model Development*, 14(1), 151-175. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-151-2021>

- TEAGUE, W. R., DOWHOWER, S. L., BAKER, S. A., HAILE, N., DELAUNE, P. B., & CONOVER, D. M. (2011). Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(3), 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.009>
- TELLER, J., VIGANÒ, P., & SCHELINGS, C. (2023). Schéma stratégique multidisciplinaire du bassin versant de la Vesdre.
- THEROND, O., & DURU, M. (2019). Agriculture et biodiversité : les services écosystémiques, une voie de réconciliation ? *Innovations Agronomiques*, 75, 29-47. <https://doi.org/10.15454/gldz6i>
- THIRY, A., & FALLON, C. (2021). La planification d'urgence sous tension. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*. <https://doi.org/10.25518/0037-9565.10651>
- THOBER, S., KUMAR, R., WANDERS, N., MARX, A., PAN, M., RAKOVEC, O., SAMANIEGO, L., SHEFFIELD, J., WOOD, E. F., & ZINK, M. (2018). Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degrees global warming. *Environmental Research Letters*, 13(1), 014003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9e35>
- VAN VOOREN, L., REUBENS, B., AMPOORTER, E., BROEKX, S., PARDON, P., VAN WAES, C., & VERHEYEN, K. (2018). Monitoring the Impact of Hedgerows and Grass Strips on the Performance of Multiple Ecosystem Service Indicators. *Environmental Management*, 62(2), 241-259. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1043-4>
- van GENUCHTEN, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- VANONGEVAL, F., & GOBIN, A. (2023). Adverse Weather Impacts on Winter Wheat, Maize and Potato Yield Gaps in northern Belgium. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy13041104>
- VIZITIU, O., & CALCIU, I. (2022). MITIGATION OF SOIL COMPACTION BY APPLYING DIFFERENT TILLAGE SYSTEMS. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 65(1).
- WANG, S., LIU, Z., OBALUM, S. E., LIANG, C., HAN, K., & HAN, H. (2023). Effects of Subsoiling Depth on Soil Aggregate Stability and Carbon Storage in a Clay-Loam Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01246-y>
- WANG, Y., LI, N., MA, Y., TONG, J., PFLEGING, W., & SUN, J. (2020). Field experiments evaluating a biomimetic shark-inspired (BioS) subsoiler for tillage resistance reduction. *Soil and Tillage Research*, 196, 104432. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104432>
- XIRUI, Z., CHAO, W., ZHISHUI, C., & ZHIWEI, Z. (2016). Design and experiment of a bionic vibratory subsoiler for banana fields in southern China. *International journal of agricultural and biological Engineering*, 9(6), 75-83.
- YANG, L., WANG, W., & WEI, J. (2023). Assessing the response of vegetation photosynthesis to flash drought events based on a new identification framework. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109545>
- YEOMANS, K. B., YEOMANS, P. A., et al. (1993). *Water for every farm*. Keyline Designs.
- YEOMANS, P. A. (1954). The Keyline plan. *The Keyline plan*.
- YU, X., QU, J., HU, S., XU, P., CHEN, Z., GAO, J., & MA, D. (2023). The effect of tillage methods on soil physical properties and maize yield in Eastern Inner Mongolia. *European Journal of Agronomy*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126852>

# Chapitre 8

## Annexes

FIGURE 8.1 – Tableaux de valeurs pour la détermination des CN

Type couverture	Mode d'aménagement	Condition hydrologique	Groupe hydrologique du sol			
			A	B	C	D
Jachère (sol nu)	ordinaire	défavorable	77	86	91	94
Cultures en ligne	ordinaire	défavorable	72	81	88	81
		favorable	67	78	85	89
	en courbe de niveau	défavorable	70	79	84	88
		favorable	65	75	82	86
	avec terrasse	défavorable	66	74	80	82
		favorable	62	71	78	81
Céréales	ordinaire	défavorable	65	76	84	88
		favorable	63	75	83	87
	en courbe de niveau	défavorable	63	74	82	85
		favorable	61	73	81	84
	avec terrasse	défavorable	61	72	79	82
		favorable	59	70	78	81

Légumineuses ou prairies temporaires	ordinaire	défavorable	66	77	85	89
		favorable	58	72	81	85
	en courbe de niveau	défavorable	64	75	83	85
		favorable	55	69	78	83
	avec terrasse	défavorable	63	73	80	83
		favorable	51	67	76	80
Pâtures		défavorable	68	79	86	89
		moyenne	49	69	79	84
		favorable	39	61	74	80
	en courbe de niveau	défavorable	47	67	81	88
		moyenne	25	59	75	83
		favorable	6	35	70	7
Forêts (boqueteaux)		défavorable	45	66	77	83
		moyenne	40	60	73	79
		favorable	25	55	70	77
Prairies permanentes		favorable	30	58	71	78



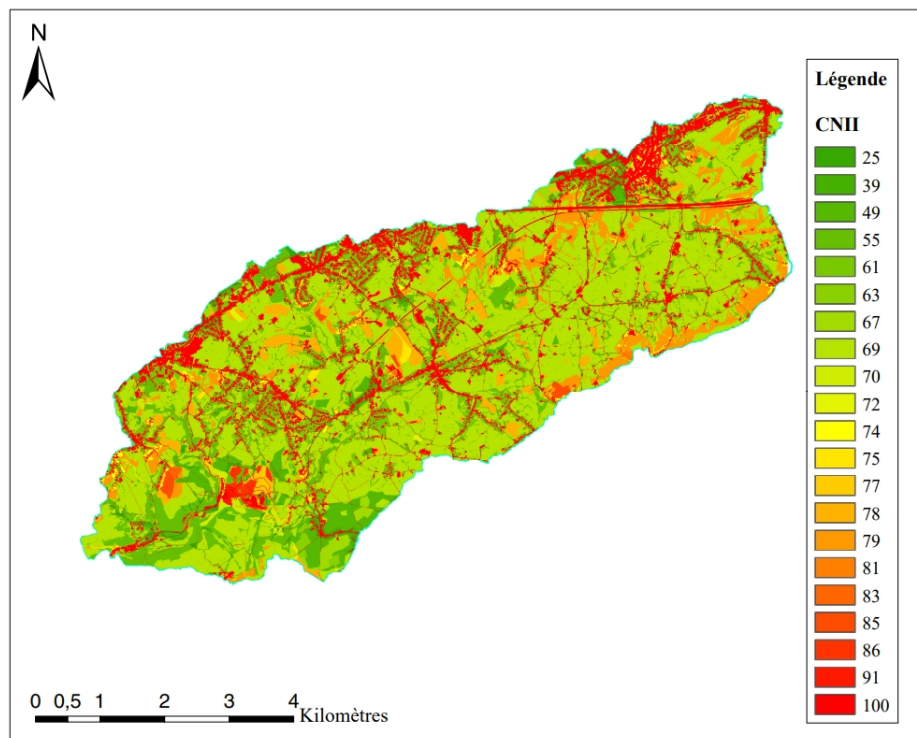
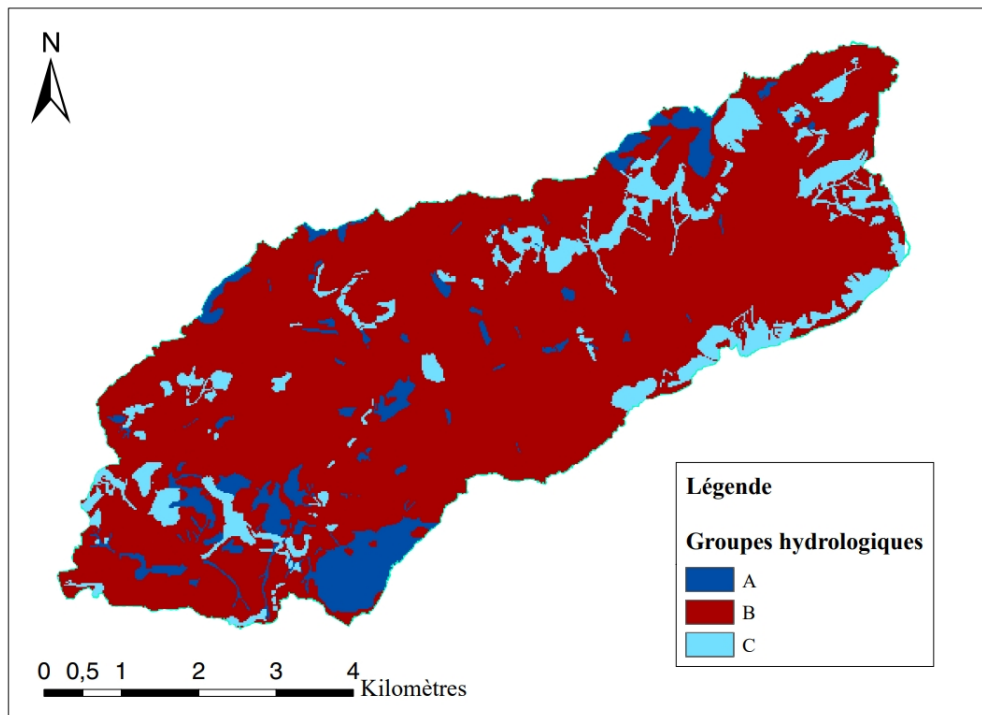
TABLE 8.1 – Classification en 9 types d’occupation pour la détermination des CN

Type de couvertures finale	OCS-Wal-ES	OCS-niv 4
Sol nu	Roche sable	
Culture en ligne		Maïs Sapin Culture sarclé Autre culture
Céréales		Céréales et assimilés
Légumineuses ou prairies temporaires		Oléagineux Culture fourragère
Pâtures favorables	Jardin parc	
Pâtures moyennes	Land Fourrage Prairie meso	Couvert herbacée en rotation toute l’année
Forêts	Forêt feuillus Forêt résineux	
Imperméable	Zone urbanisé	Culture sous serre
Eau de surface	Eaux courantes	

TABLE 8.2 – Valeurs choisies pour le CNII

Croisement des paramètres de sol	CNII
Jachère groupe A	77
Jachère groupe B	86
Jachère groupe C	91
En ligne groupe A	67
En ligne groupe B	78
En ligne groupe C	85
Céréales groupe A	63
Céréales groupe B	75
Céréales groupe C	83
Légumes groupe A	58
Légumes groupe B	72
Légumes groupe C	81
Patûres favorables groupe A	39
Patûres favorables groupe B	61
Patûres favorables groupe C	74
Patûres défavorables groupe A	49
Patûres défavorables groupe B	69
Patûres défavorables groupe C	79
Forêt groupe A	25
Forêt groupe B	55
Forêt groupe C	70
Imperméable	100
Eau	100

FIGURE 8.2 – Cartes pour la détermination du CNIIa



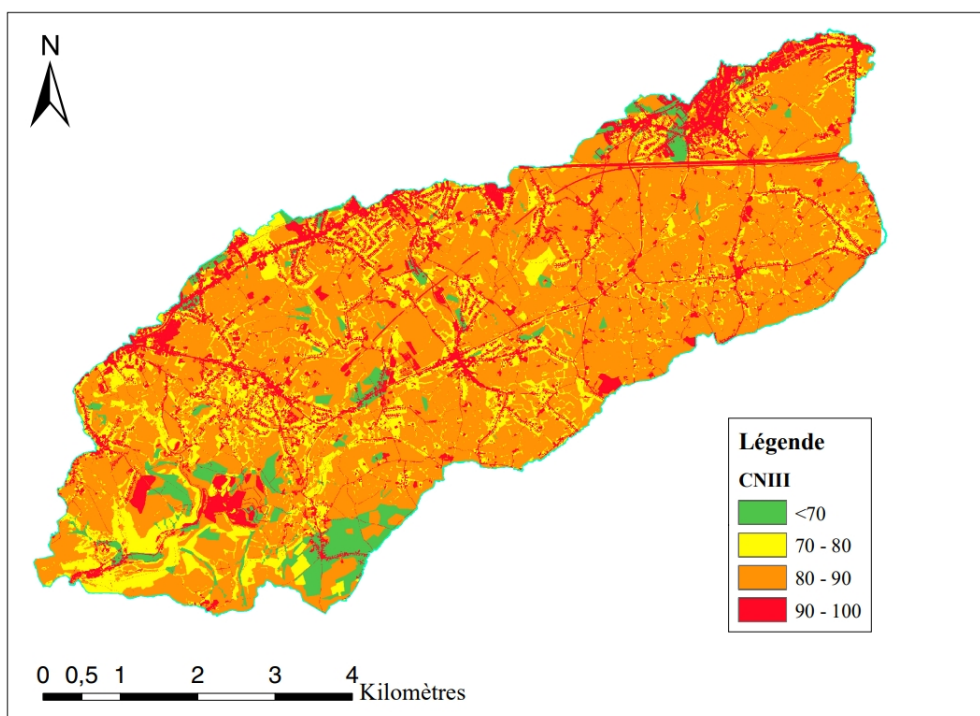


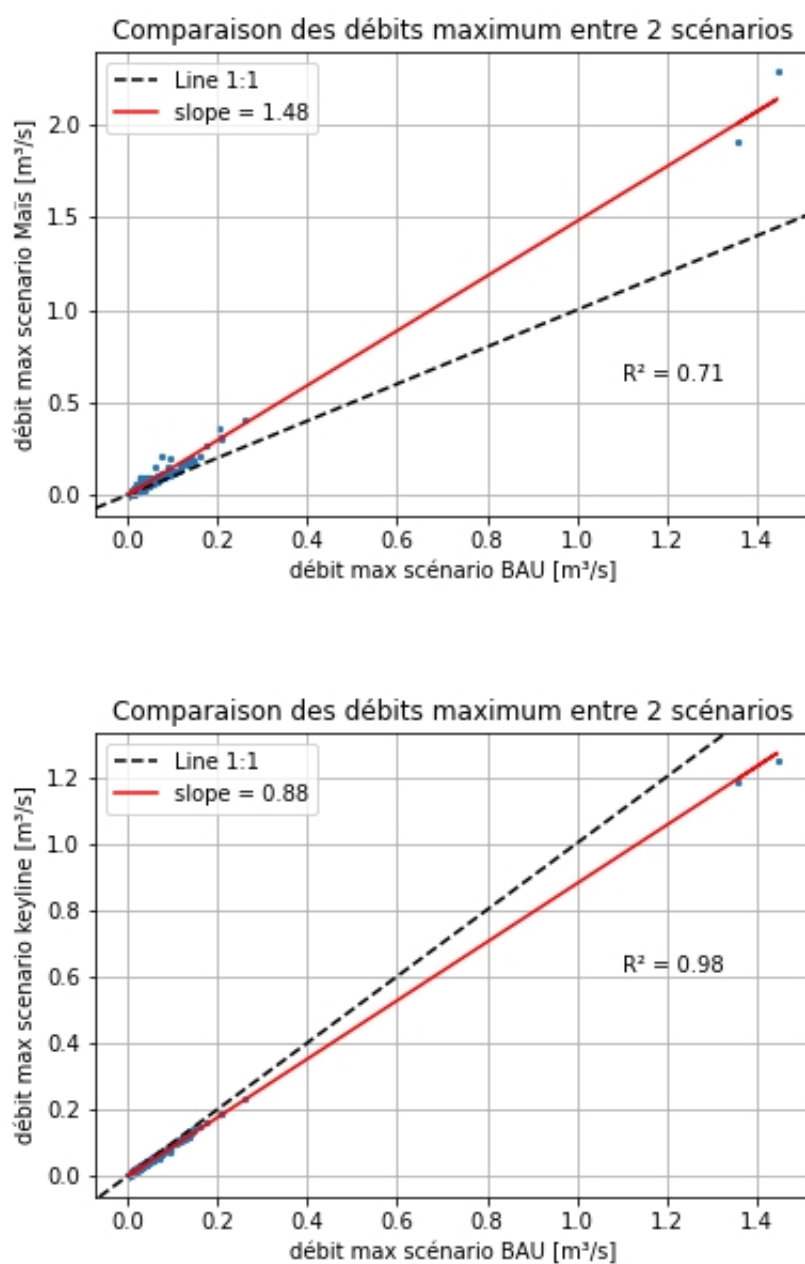
TABLE 8.3 – Valeurs de LAI, RD et Kc pour les différents types d'occupation du sol sur différentes périodes

	Période	LAI [-]	RD [mm]	Kc [-]
Pas de végétation	0	0	0	0,25
	365	0	0	0,25
Prairies	0	1	300	0,5
	45	2	300	0,5
	105	4	500	0,9
	255	4	500	0,9
	305	2	300	0,5
	365	1	300	0,5
Forêt de feuillus	0	0,5	1200	0,6
	105	1	1200	0,6
	140	6	1200	1,5
	270	6	1200	1,5
	330	2	1200	0,6
	365	0,5	1200	0,6
Culture de printemps	0	0,3	100	0,5
	170	0,3	100	0,5
	195	4	400	1,2
	220	4	400	1,2
	230	0,3	100	0,5
	365	0,3	100	0,5

TABLE 8.4 – Choix des coefficients de Manning selon les différentes occupations du sol

Types d'occupation du sol	Coefficient de manning
Prairies	1,67
Cultures de maïs	8,33
Zones imperméables	11,11
Forêts	0,83

FIGURE 8.3 – Droites de régression entre les débits maximums observés selon les différents scénarios



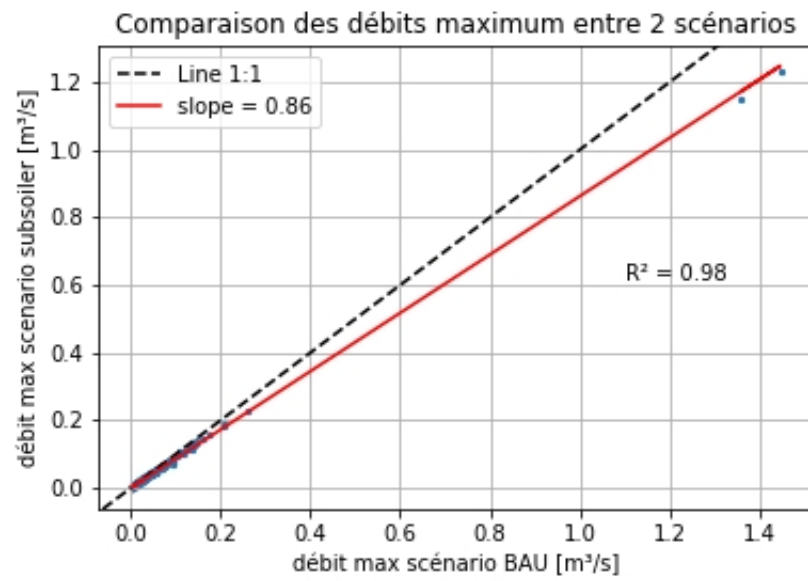
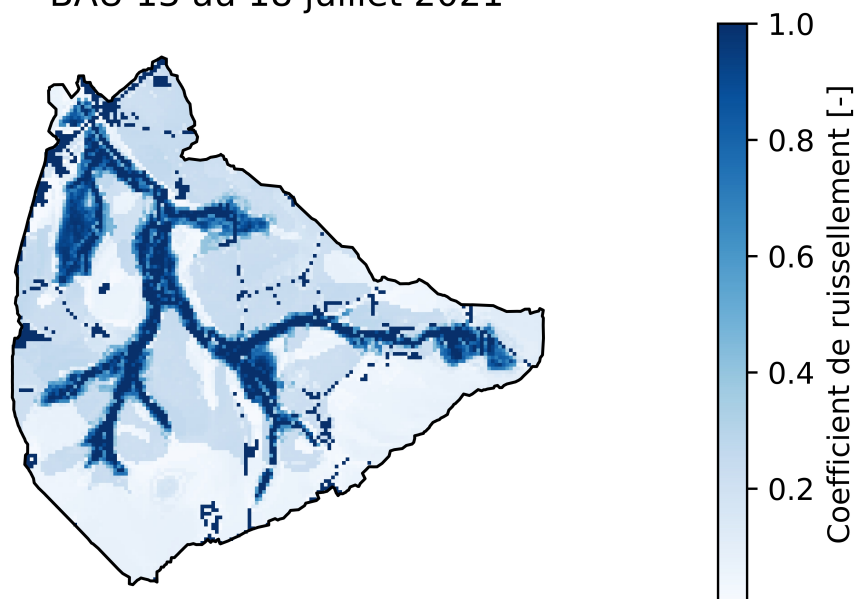
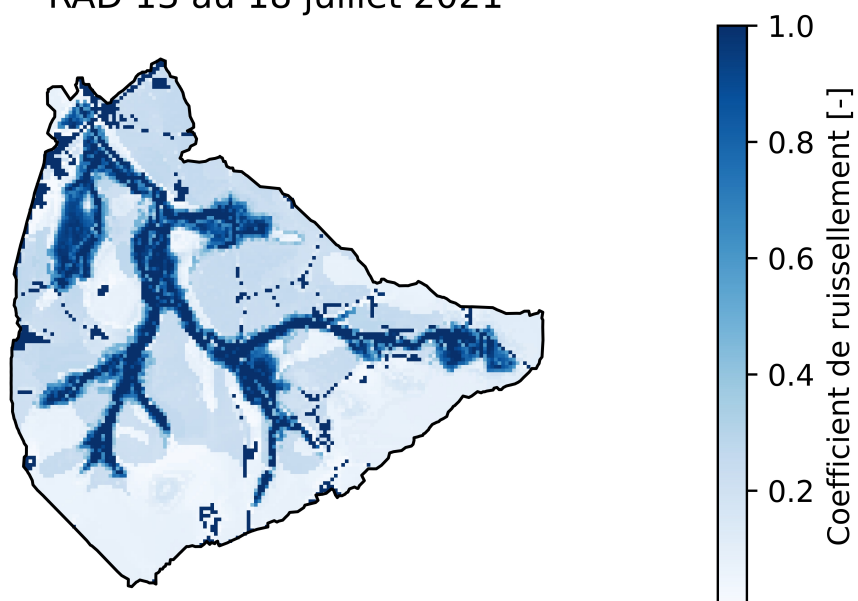


FIGURE 8.4 – Cartes des coefficients d'écoulement pour chaque scénario

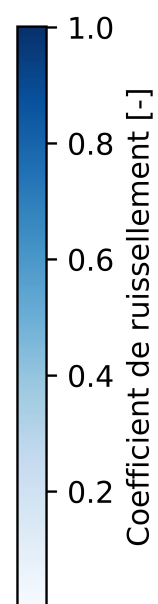
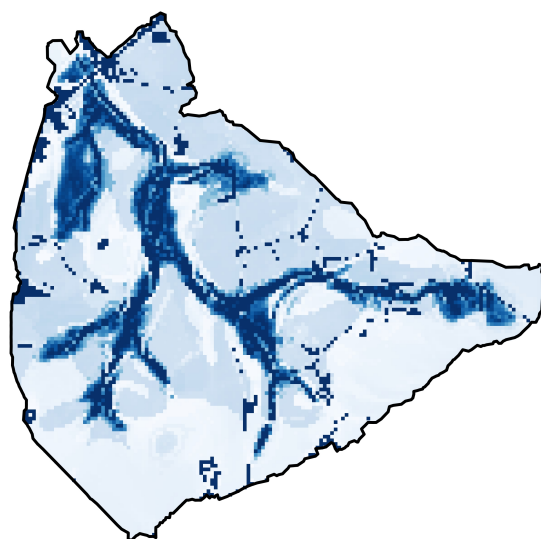
Coefficient d'écoulement  
BAU 13 au 18 juillet 2021



Coefficient d'écoulement  
RAD 13 au 18 juillet 2021



Coefficient d'écoulement  
Keyline 13 au 18 juillet 2021



Coefficient d'écoulement  
Keyline sous-solage 13 au 18 juillet 2021

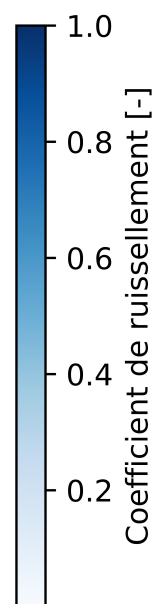
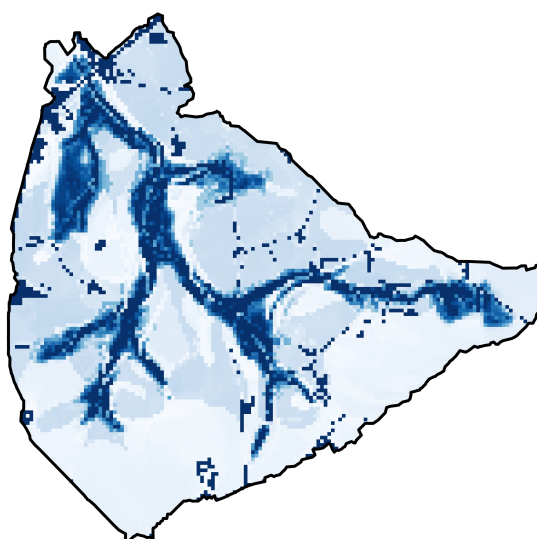
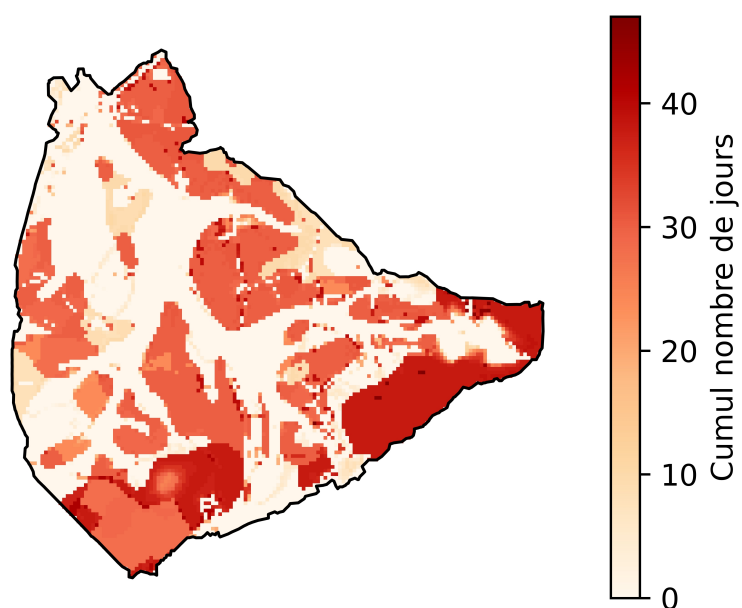


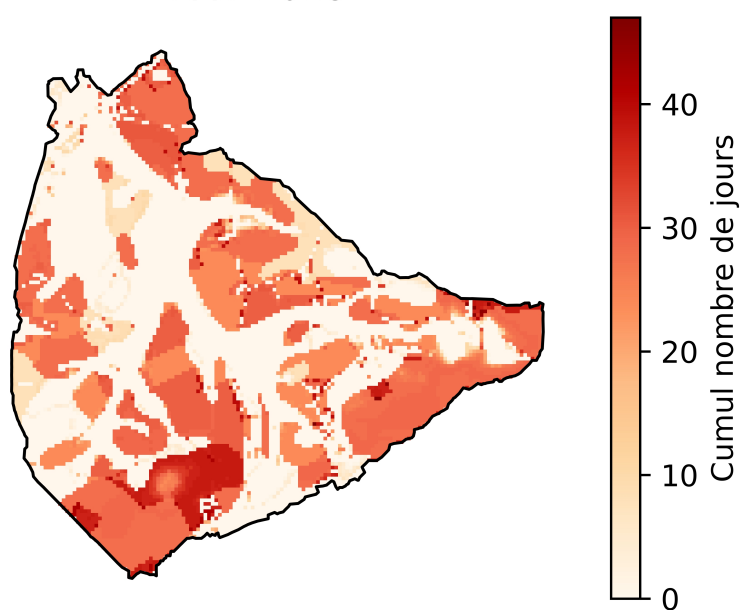


FIGURE 8.5 – Cartes du nombre de jours consécutifs sous condition sèche pour chaque scénario

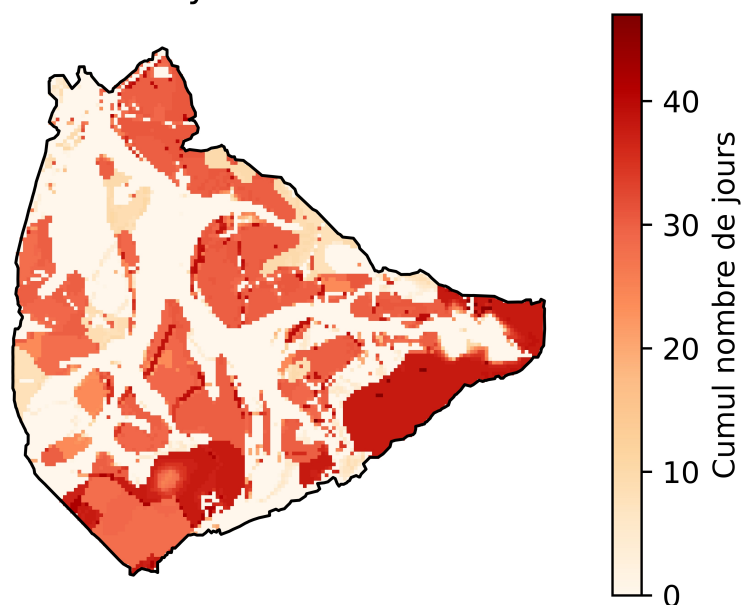
Nombre de jours consécutifs sous condition sèche  
BAU 2018



Nombre de jours consécutifs sous condition sèche  
RAD 2018



Nombre de jours consécutifs sous condition sèche  
Keyline 2018



Nombre de jours consécutifs sous condition sèche  
Keyline subsoiling 2018

